

明 細 書

マルチグレーティングを有する波長変換素子とそれを用いた光発生装置、および、円柱状強誘電体単結晶を有する波長変換素子とそれを用いた光発生装置

技術分野

本発明は、マルチグレーティングを有する波長変換素子とそれを用いた光発生装置、および、熱分布が中心対称になる波長変換素子に関する。より詳細には、本発明は、偏光方位に対応しているか、および／または、熱分布が中心対象である、損傷伝播のないマルチグレーティングを有する波長変換素子とそれを用いた光発生装置に関する。

背景技術

近年、優れた非線形光学定数および電気光学定数を有する強誘電体単結晶を用いた波長変換素子の研究が盛んに行われている。なかでも、良質な強誘電体単結晶の製造技術および分極反転形成技術の向上により、擬似位相整合方式を採用した波長変換素子の発展は目覚ましい。

ニオブ酸リチウム単結晶を利用した波長の広い範囲にわたって調整可能な（以後では、単にチューナビリティと呼ぶ）波長変換素子が開発されている（例えば、非特許文献1を参照。）。

図16は、従来技術によるマルチグレーティング型擬似位相整合（QPM）パラメトリック発振器（OPO）を示す図である。

QPM OPO 1600は、波長変換素子1601と、第1のミラー1602と、第2のミラー1603と、移動手段1604とを備える。

波長変換素子1601は、コングルエントニオブ酸リチウム（CLN）ウェハから作製されている。波長変換素子1601は、CLNウェハの分極方向に平行な方向の厚さが0.5mmであり、素子長Lは26mmである。

波長変換素子1601は、周期の異なる分極反転構造（グレーティング）を複数有する。各グレーティングの幅 W_g は500 μm である。各グレーティング間の間隔は、50 μm である。各グレーティングの周期は、26～36 μm である。グレーティングの周期が0.25 μm ずつ増分するように配置されている。

このようなグレーティングは、グレーティングごとに所定の周期を有するマスクを用いたリソグラフィ技術および電界印加法によって、繰り返し作製される。図において、マルチグレーティングのうち一部のみを示す。

第1のミラー1602および第2のミラー1603はそれぞれ、曲率半径150mmを有する。第1のミラー1602と第2のミラー1603とは、波長変換素子1601を介して配置されており、その間隔は30mmである。

移動手段1604は、波長変換素子1601を平行に移動させる。

次に、このようなQPM OPO1600の動作を説明する。

QスイッチNd:YAGレーザ（図示せず）から発生したポンプレーザ光（第1の波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ ）は、第1のミラー1602を介して所与のビーム径で波長変換素子1601の所定の周期を有するグレーティングに入射する。

この際、所定のグレーティングにポンプレーザ光が入射するように、移動手段1604は、予め波長変換素子1601を移動させる。

その後、第1の波長 λ_1 を有するポンプレーザ光は、波長変換素子1601の周期に応じて、第2の波長 λ_2 を有するシグナル光および第3の波長 λ_3 を有するアイドラ光に変換される。

この際、波長 $1.54 \mu\text{m}$ を中心とするシグナル光は、第1のミラー1602および第2のミラー1603で一部が反射する。第2のミラー1603で反射することなく透過したシグナル光およびアイドラ光がQPM OPO1600から出射する。

このようにして設計されたQPM OPO1600によれば、ポンプレーザ光の第1の波長 λ_1 が $1.064 \mu\text{m}$ であり、マルチグレーティングの周期が $26 \mu\text{m} \sim 32 \mu\text{m}$ の場合、移動手段1604によって波長変換素子1601を移動させるだけで、シグナル光の第2の波長 λ_2 は、 $1.36 \mu\text{m} \sim 1.98 \mu\text{m}$ の波長可変範囲、アイドラ光の第3の波長 λ_3 は、 $4.83 \mu\text{m} \sim 2.30 \mu\text{m}$ の波長可変範囲を達成可能である。

また、定比組成のタンタル酸リチウム単結晶を利用した波長変換素子の開発がされている（例えば、特許文献1を参照。）

図17は、従来技術による波長変換システムを示す図である。

波長変換システム1700は、波長可変レーザ1701と、レンズ1702と、

波長変換素子1703とを含む。

波長変換素子1703は、厚さ0.3mm～5mmである定比組成に近い tantalum acid lithium single crystal からなる。波長変換素子1703は、電圧印加法により作製された周期3 μ m～5 μ mの周期分極反転構造を有する。

このような波長変換システム1703において、波長可変レーザ1701が発する光（基本波）は、レンズ1702を介して波長変換素子1703に入射する。波長変換素子1703に入射した基本波は、光の導波方向に周期的に繰り返された周期分極反転構造により、基本波の第二高調波と位相整合（擬似位相整合）する。このようにして、基本波は、波長変換素子1703を伝播する間に第二高調波に変換される。

非特許文献1；L. E. Meyersら、「Multigrating quasi-phase-matched optical parametric oscillator in periodically poled LiNbO₃」、OPTICS LETTERS、April 15, 1996、Vol. 21, No. 8、pp. 591-593

特許文献1；特開2002-90785号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

しかしながら、図16に示される波長変換素子1601は単一ウェハから作製されているため、ポンプレーザ光の照射によって1つのグレーティングに生じたクラック等の損傷は、容易に他のグレーティングに伝播してしまい、損傷に弱い（損傷伝播）という難点を有する。また、波長変換素子1601は、1つのグレーティングが損傷すると素子全体を交換しなければならないため、コストがかかるという問題を有する。

波長変換素子1601は、マルチグレーティングを作製する際に、1つのグレーティングの作製に失敗する（分極反転部分が接合してしまう）と、ウェハ全体を破棄しなければならない。そのため歩留まりが悪い。

さらに、波長変換素子1601は、TM偏光を有する光のみを波長変換することができる。したがって、ポンプレーザ光の波長がTE偏光である場合には、TE偏光をTM偏光にする必要がある。このため、ポンプレーザ光の偏光に応じて、偏光子等の光学系が必要となるため、QPM OPO全体が大きくなるといった

問題が生じる。

したがって、本発明の第1の目的は、(i) 損傷伝播のないマルチグレーティングを有する波長変換素子とそれを用いた光発生装置を提供するものであり、さらには、歩留まりを向上させ、また、入射光の偏光に対しても自由度を向上させてなるものを提供するものである。

一方、図17に示される波長変換素子1703に、波長可変レーザ1701が発する光が照射されると、波長変換素子1703に熱分布が生じ得る。熱分布が生じると、波長変換素子の材料である強誘電体単結晶の熱複屈折効果が生じる。熱複屈折効果が生じると、光の偏光が乱れる（すなわち、光のモードが変化し得る）という問題を生じる。このような偏光特性の劣化は、消光比を低下させることになる。このような熱複屈折効果を補償するために、偏光子および1/4波長板等の光学系を必要とするため、装置全体が複雑になるとともに、小型化を困難にしていた。

また、熱分布によって生じた熱複屈折効果により、波長変換素子1703における位相整合条件が一部満たされなくなり得る。その結果、変換効率が大きく低下し得る。さらには、波長変換素子1703から出射する光のビーム形状が、熱分布の形状に依存して歪むことになる（円形でなくなる）。

したがって、本発明の第2の目的は、(ii) 熱分布が中心対称になる波長変換素子を提供することである。また、熱分布が中心対称であり、かつ、損傷伝播のないマルチグレーティングを有する波長変換素子およびそれを用いた光発生装置を提供するものである。さらにまた、歩留まりを向上させ、また、入射光の偏光に対しても自由度を向上させてなるものを提供するものである。

課題を解決するための手段

本発明者らにおいては、鋭意研究をした結果、上記目的は、以下に記載する手段によって解決しうることを知見した。本発明はこの知見に基づいてなされたものである。

すなわち、本発明は、上記目的(i)を達成する第1の手段による発明と、目的(ii)を達成する第2の手段による発明とを、含むものである。第1の手段による発明、第2の手段による発明は、さらに、波長変換素子、光発生装置に係る発明をそれぞれ含むものであり、これらの発明は、以下に記載する構成からなる。

〔第1の手段による発明〕

本発明の第1の手段による発明の波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、少なくとも5つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は、実質的に1とし、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に、所定の周期を有する分極反転構造を形成し、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは6つの面を有してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーブした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーブした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記温度制御素子を制御する制御部をさらに含んでもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

また、本発明の第1の手段による発明の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する光源と、前記第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも5つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に1であり、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 と第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている。これによって上記目的が達成される。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは6つの面を有してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーブした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーブした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

さらに、本発明の第1の手段による発明の別の態様の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する光源と、前記第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも5つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に1であり、前記複数の角柱状強誘電体単結

晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 とが関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これによって上記目的を達成する。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは6つの面を有してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

さらにまた、本発明の第1の手段による発明の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する第1の光源と、前記第1の光と、外部から入射した第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを結合させる光学系と、前記第1の光と第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも5つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に1であり、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 と第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは6つの面を有してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的

に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

〔第2の手段による発明〕

本発明の第2の手段による発明の波長変換素子は、断面が実質的に真円である円柱状強誘電体単結晶からなり、前記円柱状強誘電体単結晶が、前記分極方向に垂直な方向に所定の周期を有する分極反転構造を有し、これにより上記目的を達成する。

前記円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択されてもよい。

前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

また、本発明の第2の手段による発明の波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面積は、前記分極方向に垂直な方向に所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択されてもよい。

前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期であってもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記温度制御素子を制御する制御部をさらに含んでもよい。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されていてもよい。

さらに、本発明の第2の手段による発明の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する光源と、前記第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 と第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

さらにまた、本発明の第2の手段による発明の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する光源と、前記第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 とが関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

また、本発明の第2の手段による発明の光発生装置は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する第1の光源と、前記第1の光と、外部から入射した第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを結合させる光学系と、前記第1の光と第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する波長変換素子と、前記波長変換素子の位置を制御する制御部とを含み、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 と第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されており、これにより上記目的を達成する。

前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択されてもよい。

前記ホルダーは熱伝導性材料から形成されてもよい。

前記波長変換素子は、前記ホルダーに設置された温度制御素子と、前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含んでもよい。

前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御してもよい。

前記複数の柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されてもよい。

発明の効果

本発明の第1の手段による発明の波長変換素子は、ホルダーと、ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含む。複数の角柱状強誘電体単結晶は、少なくとも5つの面を有しており、それぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は、実質的に1である。これにより、角柱状強誘電体単結晶の配置を変更するだけで、入射光の偏光に対応させることができる。したがって、偏光子等の光学系が不要であるため、系全体を小型化することができる。

複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、分極方向に対して垂直な方向に、所定の周期を有する分極反転構造を有しており、分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている。これにより、分極反転構造の作製に失敗した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよいので、波長変換素子作製時における歩留まりを向上させることができる。波長変換素子のうち1つの角柱状強誘電体単結晶にクラックが生じたとしても、隣接する角柱状強誘電体単結晶にはクラックが伝播することはない。また、損傷した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、コストを削減することができる。また、ユーザのニーズに応じて、所望の組み合わせを達成することができる。

また、本発明の第2の手段による発明の波長変換素子は、断面が実質的に真円である円柱状強誘電体単結晶からなる。円柱状強誘電体単結晶は、分極方向に垂直な方向に所定の周期を有する分極反転構造を有する。円柱状強誘電体単結晶の断面が実質的に真円であるため、波長変換素子に照射された光によって熱分布が生じる場合であっても、熱分布は必ず中心対称となる。その結果、高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子から出射する光の形状は円形を維持することができる。

また、円柱状強誘電体単結晶の断面が実質的に真円であるため、円柱状強誘電体単結晶の配置角度を変更するだけで、入射光の偏光に容易に対応させることができる。したがって、偏光子等の光学系が不要であるため、系全体を小型化させることができる。

また、円柱状強誘電体単結晶は角を有さないため、角部が欠けることによって生じる不要なクラックが結晶中に生じる恐れがない。

以上の作用効果が奏せられ、期待される。

図面の簡単な説明

図1； MgO 1mol%ドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リ

チウム (MgSLT) のアイドラ光およびシグナル光発振波長の分極反転周期依存性を示す図

図 2 ; 本発明の第 1 の手段による角柱状強誘電体単結晶を示す斜視図

図 3 ; 本発明の第 1 の手段による波長変換素子を示す斜視図

図 4 ; 本発明の第 1 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 5 ; MgO1mol%ドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウム (MgSLT) のアイドラ光およびシグナル光発振波長の温度依存性を示す図

図 6 ; 本発明の第 1 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 7 ; 本発明の第 1 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 8 ; 本発明の第 1 の手段、あるいは、第 2 の手段によるパラメトリック発振を利用した光発生装置を示す図

図 9 ; 本発明の第 1 の手段、あるいは、第 2 の手段による第二高調波発生を利用した光発生装置を示す図

図 10 ; 本発明の第 1 の手段、あるいは、第 2 の手段による差周波発生を利用した光発生装置を示す図

図 11 ; 本発明の第 2 の手段による波長変換素子の斜視図

図 12 ; 本発明の第 2 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 13 ; 本発明の第 2 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 14 ; 本発明の第 2 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 15 ; 本発明の第 2 の手段による波長変換素子の別の態様を示す斜視図

図 16 ; 従来技術によるマルチグレーティング型擬似位相整合 (QPM) パラメトリック発振器 (OPG) を示す図

図 17 ; 従来技術による波長変換システムを示す図

符号の説明

200、300、400、500、600、610、700、802、902、1003、1100、1200、1400、1410、1500 : 波長変換素子

201、1101 : 周期分極反転構造

202 : 実質的な真円

301、501、1501 : ホルダー

302、401 : 複数の角柱状強誘電体単結晶

502 : 複数の円柱状強誘電体単結晶

601、1201 : 温度制御素子

602、1202 : フレーム

801、901、1001 : 光源

803、903、1004： 制御部

1002： 結合光学系

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照して本発明の各手段による発明の実施の形態を詳述する。実施の形態において、強誘電体単結晶としてMgをドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウム単結晶（MgSLT）を採用した。

本明細書中において、実質的に「定比組成である」とは、 $\text{Li}_2\text{O} / (\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Li}_2\text{O})$ のモル分率が完全に0.50ではないものの、コングルエント組成よりも化学量論比に近い組成（ $\text{Li}_2\text{O} / (\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Li}_2\text{O})$ のモル分率=0.490～0.5）を有しており、そのことに起因するデバイスの特性の低下が通常のデバイスの設計において問題にならない程度であることをいう。

このようなMgSLTは、例えば、特開2000-344595に記載される二重るつばを使用したチョクラルスキー法により作製され得る。

MgSLTは、強誘電体単結晶の一例に過ぎず、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム（SLN）、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム（SLT）、不純物（例えば、Mg、Zn、Sc、In等）をドーピングしたSLNまたはSLT等の任意の強誘電体単結晶が用いられ得ることに留意されたい。

図中、同様の要素には同様の番号を付し、その説明を省略する。

第1の手段による発明の実施形態1；

図1は、MgO1mol%ドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウム（MgSLT）のアイドラ光およびシグナル光発振波長の分極反転周期依存性を示す図である。

図において、横軸は分極反転周期を表し、縦軸はアイドラ光およびシグナル光の波長を表す。図1は、波長 $1.064\mu\text{m}$ を有するポンプ光を、種々の周期を有するMgSLTに入射させ、パラメトリック発振させた場合に生成するアイドラ光およびシグナル光の波長の分極反転周期依存性を示す。

図1から、MgSLTをパラメトリック発振器に用いた場合、分極反転周期 $29.5\mu\text{m} \sim 32\mu\text{m}$ の範囲において、アイドラ光の発振波長は、 $2.9\mu\text{m} \sim 3.7\mu\text{m}$ のチューナビリティを有することが分かる。同様に、シグナル光の波長は、 $1.5\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ のチューナビリティを有することが分かる。

図には示さないが、分極反転周期を $26\ \mu\text{m} \sim 33\ \mu\text{m}$ の範囲において、上述の MgSLT のアイドラ光発振波長は、 $2.5\ \mu\text{m} \sim 4.0\ \mu\text{m}$ のチューナビリティを有し、シグナル光発振波長は、 $1.45\ \mu\text{m} \sim 1.85\ \mu\text{m}$ のチューナビリティを有することが分かっている。

図 2 は本発明の第 1 の手段による発明の実施形態 1 による角柱状強誘電体単結晶の斜視図である。角柱状強誘電体単結晶 200 は、例えば、図 1 の MgSLT である。角柱状強誘電体単結晶 200 は、少なくとも 5 つの面を有する。図では、面が 6 の場合の角柱状強誘電体単結晶を示す。角柱状強誘電体単結晶 200 は、分極方向に対して垂直な方向に所定の周期を有する周期分極反転構造 201 を有する。つまり、1 つの角柱状強誘電体単結晶 200 は、単一のグレーティングを有する。

上述の所定の周期について説明する。角柱状強誘電体単結晶 200 を用いてパラメトリック発振させる場合、角柱状強誘電体単結晶 200 に入射する光の波長を λ_1 とし、角柱状強誘電体単結晶 200 から出射する光の波長を λ_2 および λ_3 とすると、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期の範囲が決定される。

同様に、角柱状強誘電体単結晶 200 を用いて第二高調波発生させる場合、角柱状強誘電体単結晶 200 に入射する光の波長を λ_1 とし、角柱状強誘電体単結晶 200 から出射する光の波長を λ_2 とすると、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期の範囲が決定される。

同様に、角柱状強誘電体単結晶 200 を用いて差周波発生または和周波発生させる場合、角柱状強誘電体単結晶 200 に入射する光の波長を λ_1 および λ_2 とし、角柱状強誘電体単結晶 200 から出射する光の波長を λ_3 とすると、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期が決定される。

角柱状強誘電体単結晶 200 が MgSLT の場合、パラメトリック発振の分極反転周期は、 $26\ \mu\text{m} \sim 33\ \mu\text{m}$ の範囲から選択され、第二高調波の分極反転周期は $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲から選択される。

差周波発生の場合は、 λ_2 の波長に応じて任意の分極反転周期が採用される。このような分極反転周期は、強誘電体単結晶固有であることに留意されたい。

角柱状強誘電体単結晶 200 の分極方向に対して垂直な方向の長さ L は、例えば 35 mm である。角柱状強誘電体単結晶 200 の Z 軸方向の厚さ（長さ）T は、例えば、2 mm である。角柱状強誘電体単結晶 200 の幅 W は、例えば、2 mm である。これら、長さ L、厚さ T および幅 W は、一例に過ぎず、これらの値に限定されないことに留意されたい。図では、断面は角柱状強誘電体単結晶 200 の分極方向と平行な面を示すが、これに限定されない。

このような周期分極反転構造 201 は、例えば、電圧印加法を用いて作製され得るが、この方法に限定されない。電子ビーム走査照射法およびプロトン交換熱処理法等の任意の方法を採用してもよい。角柱状強誘電体単結晶 200 の端面に反射膜が設けられていてもよい。

角柱状強誘電体単結晶 200 の長手方向に垂直な方向の面における各頂点を結んで形成される円 202 は、実質的に真円である。実質的に真円とは、円 202 の任意の直径 A および直径 B の比 (A/B) が必ずしも 1 ではないものの、このような角柱状強誘電体単結晶 200 を用いた場合に生じるデバイスの特性の低下が通常のデバイスの設計において問題にならない程度であることをいう。本明細書では、このような角柱状強誘電体単結晶 200 の円 202 が実質的に真円であることを、角柱状強誘電体単結晶 200 の長手方向に対して垂直な面の縦横比が実質的に 1 であると言う。

このように角柱状強誘電体単結晶 200 の縦横比が実質的に 1 であるため、入射光の偏光に応じて、角柱状強誘電体単結晶 200 の配置を変更することができる。つまり、角柱状強誘電体単結晶 200 は、配置を変更するだけで任意の偏光を有する光を波長変換することができる。

図 3 は、本発明の第 1 の手段による発明の実施形態 1 による波長変換素子の斜視図である。波長変換素子 300 は、ホルダー 301 と、複数の角柱状強誘電体単結晶 302 とを含む。ホルダー 301 には、複数の角柱状強誘電体単結晶 302 が収容される。ホルダー 301 のサイズ（長さ、幅、厚さ）は、収容される角柱状強誘電体単結晶 200 の数、複数の角柱状強誘電体単結晶 302 の配置に応じて変更され得る。図では、ホルダー 301 は底部と蓋部とからなるが、ホルダー 301 の構成は、このような構成に限定されない。例えば、矩形の筒であってもよい。

ホルダー 301 は、好ましくは、銅などの熱伝導性材料から形成される。これ

により、複数の角柱状強誘電体単結晶 302 で生じた、入射光の照射による熱分布を低減することができる。複数の角柱状強誘電体単結晶 302 に熱分布が生じると、複数の角柱状強誘電体単結晶 302 それぞれの屈折率が熱によって変化してしまい、所望の波長変換を行うことができない場合がある。

複数の角柱状強誘電体単結晶 302 は、それぞれの分極方向に垂直な方向が同一となるように配置されている。これにより容易にマルチグレーティングが達成され得る。図では、簡単のため、5本の角柱状強誘電体単結晶 302 が、平面状に、かつ、それぞれの分極方向が同一となるように配置されている。ただし、角柱状強誘電体単結晶 200 の数および配置様態は、角柱状強誘電体単結晶 200 のそれぞれの分極方向に垂直な方向が同一となる限り、任意である。複数の角柱状強誘電体単結晶 302 それぞれの分極反転周期は、上述の所定の周期範囲からユーザのニーズに応じて選択される。

このように本発明の波長変換素子 300 は、単一のグレーティングを有する単一の角柱状強誘電体単結晶 200 を任意に組み合わせることによってマルチグレーティングを達成する。これにより、波長変換素子 300 作製時に複数の角柱状強誘電体単結晶（マルチグレーティング）302 のうちいずれかの角柱状強誘電体単結晶が損傷した場合には、損傷した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよいので歩留まりを向上させることができる。

また、波長変換素子 300 の使用時に1つの角柱状強誘電体単結晶にクラックが発生したとしても、隣接する角柱状強誘電体単結晶にはクラックが伝播することはない。したがって、クラックが発生した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよいので、ユーザ側のコストを削減することができる。

次に、波長変換素子 300 の動作を説明する。

波長変換素子 300 の外部（例えば、光源）からの光（入射光）は、所望の波長を有する光に変換されるよう複数の角柱状強誘電体単結晶 302 のうち特定の分極反転周期を有する角柱状強誘電体単結晶に入射する。この場合、入射光の偏光モードは、縦モードであるものとする。波長変換素子 300 の分極反転周期に応じて、入射光は、パラメトリック発振、第二高調波発生または差周波発生に基づいて、波長変換される。その後、出射光として波長変換素子 300 から出射する。

例えば、パラメトリック発振の場合、ポンプ光（入射光）の波長が $1.064 \mu\text{m}$ であり、特定の分極反転周期が $31.8 \mu\text{m}$ である場合、アイドラ光および

シグナル光（出射光）の波長は、それぞれ、 $2.5\mu\text{m}$ および $1.85\mu\text{m}$ となる。このように、入射光が、特定の分極反転周期を有する角柱状強誘電体単結晶に照射するように波長変換素子300を手動で、または、機械制御を用いて移動することによって、チューナビリティが達成され得る。

図4は、本発明の第1の手段による発明の実施形態1による別の態様の波長変換素子の斜視図である。

波長変換素子400は、複数の角柱状強誘電体単結晶401の配置様態が図3と異なる以外は、図3に示す波長変換素子300と同様である。複数の角柱状強誘電体単結晶401は、それぞれの分極方向が互いに 90° となるように配置されている。ただし、図4は一例であって、複数の角柱状強誘電体単結晶401の配置様態は、任意である。

このように複数の角柱状強誘電体単結晶401を分極方向が互いに異なるように配置することによって、入射光の偏光モードがTEモードであっても、入射光の光源（図示せず）と波長変換素子400との間に偏光子等の光学系を設けることなく、波長変換することができる。したがって、系全体を小型化することができる。

本発明によれば、角柱状強誘電体単結晶200の縦横比が実質的に1であるため、入射光に対する波長変換素子300、400の分極方向を任意の方向となるように配置できる。その結果、光源の偏光に対する自由度が高くなるので、任意の光源を用いることができる。

図5は、 $\text{MgO}1\text{mol}\%$ ドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウム（ MgSLT ）のアイドラ光およびシグナル光発振波長の温度依存性を示す図である。図において、横軸は分極反転周期を表し、縦軸はアイドラ光およびシグナル光の発振波長を表す。図5は、波長 $1.064\mu\text{m}$ を有するポンプ光を、種々の温度において、種々の周期を有する MgSLT に入射させ、パラメトリック発振させた場合に生成されるアイドラ光およびシグナル光の発振波長の分極反転周期依存性を示す。図中、 MgSLT の室温（ 30°C ）における結果と MgSLT をそれぞれ 70°C 、 110°C 、 150°C および 190°C に加熱した場合の結果とを示す。

図5から、 MgSLT をパラメトリック発振器に用いた場合、例えば、アイドラ光発振波長では、同一分極反転周期において約 $0.4\mu\text{m}$ の温度によるチューナビリティを有することが分かった。分極反転構造の周期を制御することに加え

て、角柱状強誘電体単結晶 200 の温度を制御すれば、より高精度に制御されたチューナビリティを達成することができる。

図 6 は、本発明の第 1 の手段による発明のさらに別の態様の波長変換素子の斜視図である。図 6 中、(A) に示す波長変換素子 600 は、温度制御素子 601 を有する以外は図 3 を参照して説明した波長変換素子 300 と同じである。図 5 を参照して説明したように、例えば、MgSLT からなる角柱状強誘電体単結晶は、温度によるチューナビリティを有しているので、波長変換素子 600 に温度制御素子 601 を設置することによってより高精度に制御されたチューナビリティが達成され得る。

図 6 中、(B) に示す波長変換素子 610 は、温度制御素子 601 を包囲するフレーム 602 を備える。フレーム 602 は、断熱性材料から形成されている。このように、ホルダー 301 および温度制御素子 601 を断熱性のフレーム 602 で包囲することによって、温度制御素子 601 の熱の散逸を妨げ、均一に複数の角柱状強誘電体単結晶 302 を加熱することができるとともに、ユーザが温度制御素子 601 の熱によって怪我することを防ぐ。温度制御素子 601 は、例えば、ペルチェ素子であり得る。

波長変換素子 600 または 610 は、温度制御素子 601 を制御するために、制御部（図示せず）をさらに備えてもよい。このような制御部は、図 1 に示すような強誘電体単結晶材料固有の出射波長の分極反転周期依存性、および／または、図 5 に示すような強誘電体単結晶固有の出射波長の温度依存性を有しており、これらの関係を利用して適切な温度となるように温度制御素子 601 を制御してもよい。

図 7 は、本発明の第 1 の手段による別の態様による波長変換素子の斜視図である。波長変換素子 700 は、複数の角柱状強誘電体単結晶が所定の間隔で配置されており、所定の間隔には熱伝導性材料 701 が充填されている以外は、図 3 を参照して説明した波長変換素子 300 と同じである。

このように、各角柱状強誘電体単結晶間に熱伝導性材料 701 を充填することによって、入射光によって角柱状強誘電体単結晶に生じ得る熱を散逸させて、熱分布が生じるのを低減することができる。

この結果、熱による複屈折効果が低減されるので、波長変換素子 700 を伝播する光の偏光モードが維持され、変換効率を一定に保つことができる。所定の間隔は、例えば、 $50\ \mu\text{m}$ であるが、この間隔に限定されない。図 7 では、ホルダ

ー 3 0 1 と熱伝導性材料 7 0 1 とは別個の要素として示すが、ホルダー 3 0 1 と熱伝導性材料 7 0 1 とは一体型であってもよい。

以上説明してきたように、所定の周期を有する角柱状強誘電体単結晶を組み合わせ、マルチグレーティングを有する波長変換素子を形成することによって、変換波長のチューナビリティを容易に達成する。角柱状強誘電体単結晶は、縦横比が実質的に 1 であるため、入射光の偏光方位に依存しない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。本発明による波長変換素子は、角柱状強誘電体単結晶を組み合わせ形成されるため、製造時に破損した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。

さらに、使用時には、破損した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による波長変換素子は、角柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、自由度が高く、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

上記実施形態 1 では、図 2 を参照して説明した面が 6 である、M g S L T の角柱状強誘電体単結晶 2 0 0 を用いた波長変換素子の例を示してきた。これらは単に例示にすぎないことを理解されたい。任意の強誘電体単結晶材料を用い、少なくとも 5 つの面を有し、かつ、縦横比が実質的に 1 である複数の角柱状強誘電体単結晶を用いれば、本発明の効果を奏することができる。

第 1 の手段による発明の実施形態 2 ；

図 8 は、本発明の第 1 の手段による実施形態 2 に係るパラメトリック発振を利用した光発生装置を示す図である。

光発生装置 8 0 0 は、光源 8 0 1 と、波長変換素子 8 0 2 と、制御部 8 0 3 とを含む。

光源 8 0 1 は、第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光（ポンプ光）を発する。本発明によれば、第 1 の光の偏光は、T M モードであってもよいし、T E モードであってもよい。光源 8 0 1 は、例えば、第 1 の波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ の Q スイッチ N d : Y A G レーザである。光源 8 0 1 にチューナブル光源を用いてもよい。

波長変換素子 8 0 2 は、実施形態 1 で説明した波長変換素子 3 0 0、4 0 0、6 0 0、6 1 0、7 0 0 のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子 8 0 2 は、光源 8 0 1 から受け取った第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光（シグナル光）と、第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光（アイドラ光）とに波長変換する。

この際、波長変換素子 802 内の複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と、第 2 の波長 λ_2 と、第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。

角柱状強誘電体単結晶に図 1 および図 5 に示した MgSLT を用いた場合、角柱状強誘電体単結晶の分極反転周期は、 $26\ \mu\text{m} \sim 33\ \mu\text{m}$ の範囲から選択される。角柱状強誘電体単結晶は、MgSLT に限定されない。

制御部 803 は、波長変換素子 802 内の所定の角柱状強誘電体単結晶に光源 801 が発する第 1 の光が照射するように、波長変換素子 802 の位置を制御する。制御部 803 は、光源 801 から第 1 の光の有する情報（例えば、波長、偏光）を入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子 802 の位置を制御してもよい。制御部 803 は、例えば、図 1、図 5 に示す角柱状強誘電体単結晶のアイドラ光およびシグナル光の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子 802 の位置を制御してもよい。

光発生装置 800 は、光源 801 と波長変換素子 802 との間、および、波長変換素子 802 の出射側にそれぞれ反射ミラー（図示せず）を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置 800 の動作を説明する。

光源 801 は、第 1 の波長 $\lambda_1 = 1.064\ \mu\text{m}$ を有する第 1 の光を波長変換素子 802 へ発する。制御部 803 は、ユーザが所望する波長の光が得られるように、第 1 の光の有する情報（波長および偏光）等に基づいて、波長変換素子 802 の位置を制御する。例えば、ユーザが、第 3 の波長 $\lambda_3 = 3.62\ \mu\text{m}$ を有する第 3 の光（アイドラ光）を所望する場合、制御部 803 は、第 1 の光が $30\ \mu\text{m}$ の分極反転周期を有する角柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子 802 の位置を制御する。

波長変換素子 802 の所定の角柱状強誘電体単結晶に入射した第 1 の光は、上記の関係式を満たして、第 2 の波長 $\lambda_2 = 1.507\ \mu\text{m}$ を有する第 2 の光（シグナル光）および第 3 の波長 $\lambda_3 = 3.62\ \mu\text{m}$ を有する第 3 の光（アイドラ光）に波長変換される。

このようにして波長変換された第 2 の光は、光通信の波長帯域であるため、光

通信での利用が可能である。第3の光は、ガス分光に有効な波長帯域であるため、化学分析に利用可能である。

本発明による光発生装置800は、所定の周期を有する角柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子802を含む。これにより、変換波長のチューナビリティを容易に達成する。実施の形態1で説明したように、角柱状強誘電体単結晶は、縦横比が実質的に1であるため、入射光の偏光方位に依存しない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明による光発生装置800の波長変換素子802は、角柱状強誘電体単結晶を組み合わせて形成されるため、製造時に破損した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による光発生装置800の波長変換素子802は、角柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

第1の手段による発明の実施形態3；

図9は、本発明の第1の手段による発明の実施の形態3に係る第二高調波発生を利用した光発生装置を示す図である。

光発生装置900は、光源901と、波長変換素子902と、制御部903とを含む。

光源901は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光（基本波）を発する。本発明によれば、第1の光の偏光は、TMモードであってもよいし、TEモードであってもよい。光源901は、コヒーレントな第1の光を発するチューナブル半導体レーザ（波長可変レーザ）であり得る。

波長変換素子902は、実施の形態1で説明した波長変換素子300、400、600、610、700のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子902は、光源901から受け取った第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光（第二高調波）に波長変換する。

この際、波長変換素子902内の複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。角柱状強誘電体単結晶にMgSLTを用いた場合、角柱状強誘電体単結晶の分極反転周期は、 $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲から選択される。角柱状強誘電体単

結晶は、MgSLTに限定されない。

制御部903は、波長変換素子902内の所定の角柱状強誘電体単結晶に光源901が発する第1の光が照射するように、波長変換素子902の位置を制御する。制御部903は、光源901から第1の光の有する情報（例えば、波長、偏光）に入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子902の位置を制御してもよい。制御部903は、例えば、角柱状強誘電体単結晶の第2高調波の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子902の位置を制御してもよい。制御部903は、ユーザが所望する波長の光が得られるように、光源901が発する第1の波長 λ_1 を設定するように光源901を制御してもよい。

光発生装置900は、光源901と波長変換素子902との間、および、波長変換素子902の出射側にそれぞれ反射ミラー（図示せず）を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置900の動作を説明する。

例えば、ユーザが、第2の波長 $\lambda_2 = 0.39 \mu\text{m}$ を有する第2の光を所望する場合、制御部903は、光源901が第1の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ を有する第1の波長を発するように、光源901を制御する。次いで、制御部903は、第1の光の有する情報（波長および偏光）等に基づいて、波長変換素子902の位置を制御する。この場合、制御部903は、第1の光が $3 \mu\text{m}$ の分極反転周期を有する角柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子902の位置を制御する。波長変換素子902の所定の角柱状強誘電体単結晶に入射した第1の光は、上記の関係式を満たして、第2の波長 $\lambda_2 = 0.39 \mu\text{m}$ を有する第2の光（第二高調波）に波長変換される。

上記実施形態3による光発生装置900は、所定の周期を有する角柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子902を含む。これにより、特に、基本波を発するチューナブルな光源901に対して常に位相整合した第二高調波を発生することができる（すなわち、光源901のチューナビリティを容易に達成する）。

実施形態1で説明したように、角柱状強誘電体単結晶は、縦横比が実質的に1であるため、入射光の偏光方位に依存しない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明による波長変換素子は、角柱状強誘電体単結晶を組み合わせ形成され

るため、製造時に破損した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。また、角柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて光学素子、光発生装置を設計することができるので、ユーザのニーズに対して、自由度が高く、任意に調整可能である。

第1の手段による発明の実施形態4；

図10は、本発明の第1の手段による発明の実施形態4による差周波発生を利用した光発生装置を示す図である。

光発生装置1000は、光源1001と、結合光学系1002と、波長変換素子1003と、制御部1004とを含む。

光源1001は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光（ポンプ光）を発する。本発明によれば、第1の光の偏光は、TMモードであってもよいし、TEモードであってもよい。光源1001は、例えば、第1の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ の半導体レーザであり得る。光源1001にチューナブル光源を用いてもよい。

結合光学系1002は、光源1001からの第1の光と、第2の波長 λ_2 を有する第2の光（シグナル光）とを結合する任意の光学系である。第2の光は、例えば、波長領域多重（WDM）において代表的な通信帯であるCバンド帯（ $1.53 \mu\text{m} \sim 1.57 \mu\text{m}$ ）の光である。第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 は、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ を満たす。

波長変換素子1003は、実施の形態1で説明した波長変換素子300、400、600、610、700のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子1003は、結合光学系1002で結合された第1の光と第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光（出力光）に波長変換する。

この際、波長変換素子1003内の複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と、第2の波長 λ_2 と、第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。角柱状強誘電体単結晶は、MgSLTに限定されない。

制御部1004は、波長変換素子1003内の所定の角柱状強誘電体単結晶に結合光学系1002で結合された第1の光および第2の光が照射するように、波長変換素子1003の位置を制御する。制御部1004は、光源1001から第1の光の有する情報（例えば、波長、偏光）および第2の光の有する情報（例え

ば、波長、偏光)を入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子1003の位置を制御してもよい。制御部1004は、例えば、角柱状強誘電体単結晶のシグナル光および出射光の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子1003の位置を制御してもよい。

光発生装置1000は、結合光学系1002と波長変換素子1003との間、および、波長変換素子1003の出射側にそれぞれ反射ミラー(図示せず)を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置1000の動作を説明する。

例えば、ユーザが、第1の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ を用いて、第2の波長 $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$ を有する第2の光(Cバンド帯)をLバンド帯の波長を有する第3の光に変換することを所望する場合、制御部1004は、第1の光の有する情報(波長および偏光)および第2の光の有する情報(波長および偏光)等に基づいて、波長変換素子1003の位置を制御する。この場合、制御部1004は、結合光学系1002で結合された第1の光および第2の光が、例えば、 $17 \mu\text{m}$ の分極反転周期を有する角柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子1003の位置を制御する。波長変換素子1003の所定の角柱状強誘電体単結晶に入射した第1の光および第2の光は、上記の関係式を満たして、第3の波長 $\lambda_3 = 1.57 \mu\text{m}$ を有する第3の光に波長変換される。このようにして変換された第3の波長 λ_3 は、波長領域多重(WDM)において代表的な通信帯であるLバンド帯($1.57 \mu\text{m} \sim 1.62 \mu\text{m}$)である。

前記実施形態4による光発生装置1000は、所定の周期を有する角柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子を含む。これにより、光源1001がチューナブル光源であれば、固定のCバンド帯の波長(第2の光の第2の波長 λ_2)を、Lバンド帯の波長(第3の波長 λ_3)へとチューナブルに調整することができる。

また、光源1001が単一波長を発する光源である場合、Cバンド帯の波長(第2の光の第2の波長 λ_2)を可変にすれば、Lバンド帯の波長(第3の波長 λ_3)をチューナブルに調整することができる。

このように、C-Lバンド変換をチューナブルに行うことができる。実施の形態1で説明したように、角柱状強誘電体単結晶は、縦横比が実質的に1であるため、入射光の偏光方位に依存しない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明の光発生装置 1000 の波長変換素子 1003 は、角柱状強誘電体単結晶を組み合わせて形成されるため、製造時に破損した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による光発生装置 1000 の波長変換素子 1003 は、角柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

図 10 に示される光発生装置 1000 を用いて、差周波発生させる場合を説明したが、光発生装置 1000 を用いて和周波発生させることもできることに留意されたい。この場合、波長変換素子 1003 内の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と、第 2 の波長 λ_2 と、第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有していればよい。

第 2 の手段による発明の実施形態 1 ；

図 11 は、本発明の第 2 の手段による実施の形態 1 による円柱状強誘電体単結晶からなる波長変換素子の斜視図である。

円柱状強誘電体単結晶 1100 は、例えば、図 1 に示した MgSLT を使用することができる。円柱状強誘電体単結晶 1100 の断面の直径は、例えば、1.5 mm である。円柱状強誘電体単結晶 1100 は、分極方向に対して垂直な方向に所定の周期を有する周期分極反転構造 1101 を有する。つまり、1 つの円柱状強誘電体単結晶 1100 は、単一のグレーティングを有する。図では、断面は円柱状強誘電体単結晶 1100 の分極方向と平行な面を示すが、これに限定されない。

上述の所定の周期について説明する。円柱状強誘電体単結晶 1100 を用いてパラメトリック発振させる場合、円柱状強誘電体単結晶 1100 に入射する光の波長を λ_1 とし、円柱状強誘電体単結晶 1100 から出射する光の波長を λ_2 および λ_3 とすると、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期の範囲が決定される。

同様に、円柱状強誘電体単結晶 1100 を用いて第二高調波発生させる場合、円柱状強誘電体単結晶 1100 に入射する光の波長を λ_1 とし、円柱状強誘電体単結晶 1100 から出射する光の波長を λ_2 とすると、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期の範囲が決定される。

同様に、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 を用いて差周波発生または和周波発生させる場合、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 に入射する光の波長を λ_1 および λ_2 とし、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 から出射する光の波長を λ_3 とすると、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する分極反転周期が決定される。円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 が MgSLT の場合、パラメトリック発振の分極反転周期は、 $26\ \mu\text{m} \sim 33\ \mu\text{m}$ の範囲から選択され、第二高調波の分極反転周期は $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲から選択される。

差周波発生の場合は、 λ_2 の波長の応じて任意の分極反転周期が採用される。このような分極反転周期は、強誘電体単結晶固有であることに留意されたい。

円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の分極方向に対して垂直な方向の長さ L は、例えば $35\ \text{mm}$ である。円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の断面の任意の位置の直径 D (例えば、 Z 軸方向) は、 $1.5\ \text{mm}$ である。これら、長さ L および直径 D は、一例に過ぎず、これらの値に限定されないことに留意されたい。

このような円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の作製は、例えば、最初に角柱状強誘電体単結晶が切り出される。次いで、周期分極反転構造 1 1 0 1 が、電圧印加法、電子ビーム走査照射法およびプロトン交換熱処理法等の任意の方法を用いて切り出された角柱状強誘電体単結晶に作製され得る。その後、角柱状強誘電体単結晶は、所定の型 (例えば、中空体) を用いて打ち抜かれる。ただし、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の作製方法はこれに限定されない。また、 Z 軸方位が分かるように、所定の位置にオリフラを設けてもよい。円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の端面に反射膜が設けられていてもよい。

本発明の円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の断面は、実質的に真円である。実質的に真円とは、断面の異なる任意の位置の直径の比が必ずしも 1 ではないものの、このような円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 を用いた場合に生じるデバイスの特性の低下が通常のデバイスの設計において問題にならない程度であることをいう。

このように円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の断面が実質的に真円であるため、入射光の偏光に応じて、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の配置を変更することができる。つまり、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 は、配置角度を変更するだけで任意の偏光を有する光を波長変換することができる。

図 11 に示される波長変換素子 (円柱状強誘電体単結晶) 1 1 0 0 を用いて第

二高調波を発生させる場合の、波長変換素子 1 1 0 0 の動作を説明する。

波長変換素子 1 1 0 0 は、光源（図示せず）と集光光学系（図示せず）とともに用いられ得る。光源は、例えば、第 1 の波長 λ_1 が 780 nm である第 1 の光（基本波）を発する半導体レーザであり得るが、これに限定されない。光源は、コヒーレントである限り、任意の光源を用いることができる。集光光学系は、第 1 の光を集光し、波長変換素子 1 1 0 0 に入射させるように機能する任意の光学系であり得る。

光源が発する第 1 の光は、集光光学系を介して波長変換素子 1 1 0 0 に入射する。周期分極反転構造 1 1 0 1 は、光源の第 1 の光（基本波）の伝播方向に周期的に繰り返されている。このような周期分極反転構造 1 1 0 1 により、基本波とその第二高調波とが位相整合（擬似位相整合）する。このようにして、基本波は、波長変換素子 1 1 0 0 を伝播する間に第 2 の波長 λ_2 が 390 nm である第 2 の光（第二高調波）に変換される。なお、波長変換素子 1 1 0 0 の基本波の入射面と出射面とに反射膜を設けて、波長変換素子 1 1 0 0 を共振器として機能させてもよい。

なお、上述したように、この実施態様の波長変換素子 1 1 0 0 は円柱状強誘電体単結晶からなるので、第 1 の光の偏光に合わせて、円柱状強誘電体単結晶の配置角度を変更することができる。つまり、波長変換素子 1 1 0 0 は、任意の偏光を有する光を波長変換することができる。これにより、光源の偏光に対する自由度が向上するので、任意の光源を用いることができる。円柱状強誘電体単結晶の配置角度の変更は、手動で行ってもよいし、または、機械制御で行ってもよい。

第 1 の光の照射によって波長変換素子 1 1 0 0 に熱分布が生じたとしても、波長変換素子 1 1 0 0 の断面が実質的に真円であるため、熱分布は中心対称となる。この際、第 1 の光は波長変換素子 1 1 0 0 の中心に照射されていることに留意されたい。したがって、熱分布が中心対称であるため熱複屈折が低減されるので、波長変換素子 1 1 0 0 を伝播する光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子 1 1 0 0 から出射する光の形状は、歪むことなく円形に維持される。

同様にして、波長変換素子 1 1 0 0 を用いてパラメトリック発振および差周波発生させることができることを理解されたい。これについては、図 5 においてすでに説明しており、ここでは、説明を省略する。

分極反転構造の周期を制御することに加えて、円柱状強誘電体単結晶 1 1 0 0 の温度を制御すれば、より高精度に制御されたチューナビリティを達成することができる。

図12は、本発明の第2の手段による発明の実施の形態1による円柱状強誘電体単結晶からなる別の波長変換素子の斜視図である。

図12に示す波長変換素子1200は、温度制御素子1201と温度制御素子1201を覆うフレーム1202とを有する以外は図11に示す波長変換素子1100と同様である。図5を参照して説明したように、例えば、MgSLTからなる円柱状強誘電体単結晶は、温度によりチューナビリティを有しているので、波長変換素子1100に温度制御素子1201を設置することによってより高精度に制御されたチューナビリティが達成され得る。さらに、温度制御素子1201を包囲するようにフレーム1202は、断熱性材料から形成される。これにより、温度制御素子1201の熱の散逸を妨げ、均一に円柱状強誘電体単結晶1100を加熱することができるとともに、ユーザが温度制御素子1201の熱によって怪我することを防ぐ。図において、温度制御素子1201は、円柱状強誘電体単結晶1100全体を覆っているが、円柱状強誘電体単結晶1100の温度を均一にすることができる限り任意の温度制御素子を用いることができる。温度制御素子1201は、例えば、ペルチェ素子であり得る。

波長変換素子1200は、温度制御素子1201を制御するために、制御部（図示せず）をさらに備えてもよい。このような制御部は、図5に示すような強誘電体単結晶固有の出射波長の温度依存性を有しており、この情報を利用して円柱状強誘電体単結晶1100が適切な温度となるように制御してもよい。また、制御部は、温度の制御に加えて、波長変換素子1200に入射する光の偏光に関する情報を入手し、入射光の偏光に応じて波長変換素子1200の角度配置を変更するように制御してもよい。

以上、図11および図12を参照して説明したように、本発明による円柱状強誘電体単結晶からなる波長変換素子1100および1200は、断面が実質的に真円であるため、波長変換素子に照射された光によって熱分布が生じる場合でもあっても、熱分布は必ず中心対称となる。その結果、光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子1100および1200から出射する光の形状が円形に維持される。

また、円柱状強誘電体単結晶の断面が実質的に真円であるため、円柱状強誘電体単結晶の配置角度を変更するだけで、入射光の偏光に容易に対応させることができる。したがって、偏光子等の光学系が不要であるため、系全体を小型化させることができる。また、任意の光源を用いることができる。

また、円柱状強誘電体単結晶は角を有さないため、角部が欠けることによって

生じる不要なクラックが結晶中に生じる恐れがない。

(第2の手段による発明の実施の形態2)

図13は、本発明の第2の手段による実施の形態2の波長変換素子を示す斜視図である。

波長変換素子500は、ホルダー501と、複数の円柱状強誘電体単結晶502を含む。

ホルダー501には、複数の円柱状強誘電体単結晶502が収容される。ホルダー501のサイズ(長さ、幅、厚さ)は、収容される円柱状強誘電体単結晶1100の数、複数の円柱状強誘電体単結晶502の配置に応じて変更され得る。図では、ホルダー501は、半円が模られた底部と蓋部とからなるが、ホルダー501の構成は、このような構成に限定されない。例えば、矩形の筒であってもよい。

ホルダー501は、好ましくは、銅などの熱伝導性材料から形成される。実施の形態1で説明したように、複数の円柱状強誘電体単結晶502は、入射光の照射による熱分布は必ず中心対称となる。このため、円柱状強誘電体単結晶1100に熱分布が生じたとしても、光の高い消光比(すなわち、高い直線偏光性)を保持することができる。しかしながら、ホルダー501が熱伝導性材料であれば、入射光の照射による熱を容易に散逸させることができるので、熱分布の発生を低減することができる。

複数の円柱状強誘電体単結晶502は、それぞれの分極方向に垂直な方向が同一となるように配置されている。これにより容易にマルチグレーティングが達成され得る。図では、簡単のため、5本の円柱状強誘電体単結晶502が、平面状に、かつ、それぞれの分極方向が同一となるように配置されている。ただし、円柱状強誘電体単結晶1100の数および配置様態は、円柱状強誘電体単結晶1100のそれぞれの分極方向に垂直な方向が同一となる限り、任意である。複数の円柱状強誘電体単結晶502それぞれの分極反転周期は、実施の形態1で説明した、パラメトリック発振、第二高調波発生または差周波発生を達成する所定の周期範囲からユーザのニーズに応じて選択される。複数の円柱状強誘電体単結晶502それぞれの分極反転周期は、異なる。

このように本発明の第2の手段による波長変換素子500は、単一のグレーティングを有する単一の円柱状強誘電体単結晶1100を任意に組み合わせることによってマルチグレーティングを達成する。これにより、波長変換素子500作製時に複数の円柱状強誘電体単結晶(マルチグレーティング)502のうちいずれかの円柱状強誘電体単結晶が損傷した場合には、損傷した円柱状強誘電体単結

晶のみを交換すればよいので歩留まりを向上させることができる。また、波長変換素子500の使用時に1つの円柱状強誘電体単結晶にクラックが発生したとしても、隣接する円柱状強誘電体単結晶にはクラックが伝播することはない。したがって、クラックが発生した円柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよいので、ユーザ側のコストを削減することができる。

次に、前記波長変換素子500の動作を説明する。

波長変換素子500の外部（例えば、光源）からの光（入射光）は、所望の波長を有する光に変換されるよう複数の円柱状強誘電体単結晶502のうち特定の分極反転周期を有する円柱状強誘電体単結晶に入射する。波長変換素子500の分極反転周期に応じて、入射光は、パラメトリック発振、第二高調波発生または差周波発生に基づいて、波長変換される。その後、出射光として波長変換素子500から出射する。

例えば、パラメトリック発振の場合、ポンプ光（入射光）の波長が $1.064\mu\text{m}$ であり、特定の分極反転周期が $31.8\mu\text{m}$ である場合、アイドラ光およびシグナル光（出射光）の波長は、それぞれ、 $2.5\mu\text{m}$ および $1.85\mu\text{m}$ となる。このように、入射光が、特定の分極反転周期を有する円柱状強誘電体単結晶に照射するように波長変換素子500を手動で、または、機械制御を用いて移動することによって、チューナビリティが達成され得る。

また、波長変換素子500は複数の円柱状強誘電体単結晶502からなるので、入射光の偏光に合わせて、複数の円柱状強誘電体単結晶それぞれの配置角度を変更することができる。つまり、波長変換素子500は、任意の偏光を有する光を波長変換することができる。これにより、光源の偏光に対する自由度が向上するので、任意の光源を用いることができる。複数の円柱状強誘電体単結晶それぞれの配置角度の変更は、手動で行ってもよいし、または、機械制御で行ってもよい。

このように複数の円柱状強誘電体単結晶502のそれぞれの断面を実質的に真円とすることによって、入射光の偏光モードがTEモードであってもTMモードであっても、入射光の光源（図示せず）と波長変換素子500との間に偏光子等の光学系を設けることなく、波長変換することができる。したがって、系全体を小型化することができる。

図14は、本発明の実施の形態2によるさらに別の波長変換素子の斜視図である。

図14中、(A)に示す波長変換素子1400は、温度制御素子601を有す

る以外は図13を参照して説明した波長変換素子500と同じである。図5を参照して説明したように、例えば、MgSLTからなる円柱状強誘電体単結晶は、温度によるチューナビリティを有しているので、波長変換素子500に温度制御素子601を設置することによってより高精度に制御されたチューナビリティが達成され得る。図において、温度制御素子601はシート形状であるが、温度制御素子601は、複数の円柱状強誘電体単結晶502の温度を均一にすることができる限り、任意の温度制御素子を用いることができる。温度制御素子601は、例えば、ペルチェ素子であり得る。

図14図中、(B)に示す波長変換素子1410は、温度制御素子601を包囲するフレーム602を備える。フレーム602は、断熱性材料から形成されている。このように、ホルダー501および温度制御素子601を断熱性のフレーム602で包囲することによって、温度制御素子601の熱の散逸を妨げ、均一に複数の円柱状強誘電体単結晶502を加熱することができるとともに、ユーザが温度制御素子601の熱によって怪我することを防ぐ。

波長変換素子1400または1410は、温度制御素子601を制御するために、制御部(図示せず)をさらに備えてもよい。このような制御部は、図1に示すような強誘電体単結晶材料固有の出射波長の分極反転周期依存性、および/または、図5に示すような強誘電体単結晶固有の出射波長の温度依存性を有しており、これらの関係を利用して、波長変換素子1400または1410が適切な温度となるように温度制御素子601を制御してもよい。また、制御部は、温度の制御に加えて、波長変換素子1400または1410に入射する光の偏光に関する情報を入手し、入射光の偏光に応じて波長変換素子1400または1410の角度配置を変更するように制御してもよい。

図15は、本発明の第2の手段による発明の実施の形態2によるさらに別の波長変換素子の斜視図である。

波長変換素子1500は、複数の円柱状強誘電体単結晶が所定の間隔で配置されており、所定の間隔に熱伝導性材料が充填されたホルダー1501である以外は、図13を参照して説明した波長変換素子500と同じである。このように、各円柱上強誘電体単結晶間に熱伝導性材料を充填することによって、入射光によって円柱状強誘電体単結晶に生じ得る熱を散逸させて、熱分布が生じるのを低減することができる。この結果、熱による複屈折効果が低減されるので、波長変換素子1500を伝播する光の偏光モードが維持され、変換効率を一定に保つことができる。所定の間隔は、例えば、 $50\mu\text{m}$ であるが、この間隔に限定されない。この場合、熱伝導性材料とホルダーとが一体型の例を示したが、別個であってもよい。

以上説明してきたように、それぞれが所定の周期を有する分極反転構造を有する円柱状強誘電体単結晶を組み合わせ、マルチグレーティングを有する波長変換素子を形成することによって、変換波長のチューナビリティを容易に達成する。円柱状強誘電体単結晶は、その断面が実質的に真円であるため、入射光の偏光方位に依存しない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。また、入射光の照射による熱分布が中心対称となるため、熱分布が生じたとしても光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）をすることができる。

本発明による波長変換素子は、円柱状強誘電体単結晶を組み合わせ形成されるため、製造時に破損した円柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した円柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による波長変換素子は、円柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせ形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

この第2の手段による発明の実施形態2では、図11を参照して説明し、MgSLTの円柱状強誘電体単結晶1100を用いた波長変換素子の例を示してきた。これらは単に例示にすぎないことを理解されたい。任意の強誘電体単結晶材料を用い、少なくとも断面の直径が2mmであり、かつ、断面が実質的に真円である複数の円柱状強誘電体単結晶を用いれば、上記効果を奏することができる。

（第2の手段による実施形態3）

本発明の第2の手段による発明は、さらにパラメトリック発振を利用した光発生装置に係る発明を実施の形態として含むものである。その構成は、波長変換素子が、一方が角柱状強誘電体によるのに対し、他方は円柱状強誘電体による違いの外は、図8に示す光発生装置と基本的に同様である。以下、この光発生装置は、図8に基づいて説明する。

本発明の実施の形態3によるパラメトリック発振を利用した光発生装置800は、光源801と、波長変換素子802と、制御部803とを含む。

光源801は、第1の波長 λ_1 を有する第1の光（ポンプ光）を発する。本発明によれば、第1の光の偏光は、TMモードであってもよいし、TEモードであってもよい。光源801は、例えば、第1の波長 $\lambda_1 = 1.064 \mu\text{m}$ のQスイッチNd:YAGレーザである。光源801にチューナブル光源を用いてもよい。

波長変換素子 802 は、すでに実施の形態 2 で説明した波長変換素子 500、1400、1410、1500 のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子 802 は、光源 801 から受け取った第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光（シグナル光）と、第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光（アイドラ光）とに波長変換する。この際、波長変換素子 802 内の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と、第 2 の波長 λ_2 と、第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。円柱状強誘電体単結晶に図 1、図 5 に示した MgSLT を用いた場合、円柱状強誘電体単結晶の分極反転周期は、 $26\ \mu\text{m} \sim 33\ \mu\text{m}$ の範囲から選択される。円柱状強誘電体単結晶は、MgSLT に限定されない。

制御部 803 は、波長変換素子 802 の位置を制御する。詳細には、制御部 803 は、光源 801 から第 1 の光の有する情報（例えば、波長、偏光）を入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子 802 の位置を制御する。本明細書において、波長変換素子 802 の位置を制御するとは、制御部 803 が、光源 801 からの第 1 の光の有する情報のうち偏光モードに基づいて、波長変換素子 802 の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの配置角度を第 1 の光の偏光モードに対応するように制御すること、および／または、制御部 803 が、光源 801 からの第 1 の光の有する情報のうち波長に基づいて、波長変換素子 802 のうち所定の円柱状強誘電体単結晶に光源 801 が発する第 1 の光が照射するように、波長変換素子 802 の位置を制御することを意味する。

制御部 803 は、例えば、図 1、図 5 に示す円柱状強誘電体単結晶のアイドラ光およびシグナル光の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子 802 の位置を制御してもよい。

光発生装置 800 は、光源 801 と波長変換素子 802 との間、および、波長変換素子 802 の出射側にそれぞれ反射ミラー（図示せず）を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置 800 の動作を説明する。

光源 801 は、第 1 の波長 $\lambda_1 = 1.064\ \mu\text{m}$ を有する第 1 の光を波長変換素子 802 へ発する。制御部 803 は、ユーザが所望する波長の光が得られるように、第 1 の光の有する情報（波長および偏光）等に基づいて、波長変換素子 802 の位置を制御する。例えば、ユーザが、第 3 の波長 $\lambda_3 = 3.62\ \mu\text{m}$ を有する第 3 の光（アイドラ光）を所望する場合、制御部 803 は、第 1 の光が $30\ \mu\text{m}$

の分極反転周期を有する円柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子 802 の位置を制御する。

波長変換素子 802 の所定の円柱状強誘電体単結晶に入射した第 1 の光は、上記の関係式を満たして、第 2 の波長 $\lambda_2 = 1.507 \mu\text{m}$ を有する第 2 の光（シグナル光）および第 3 の波長 $\lambda_3 = 3.62 \mu\text{m}$ を有する第 3 の光（アイドラ光）に波長変換される。このようにして波長変換された第 2 の光は、光通信の波長帯域であるため、光通信での利用が可能である。第 3 の光は、ガス分光に有効な波長帯域であるため、化学分析に利用可能である。

本発明の第 2 の手段による光発生装置 800 は、所定の周期を有する円柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子 802 を含む。これにより、変換波長のチューナビリティを容易に達成する。実施の形態 1 で説明したように、円柱状強誘電体単結晶は、分極方向と同じ方向の断面が実質的に真円であるため、波長変換素子 802 に照射された光によって円柱状強誘電体単結晶に熱分布が生じる場合であっても、熱分布は必ず中心対称となる。その結果、光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子 802 が出射する光（第 2 の光および第 3 の光）の形状は、円形に維持される。さらに、入射光の偏光方位に対する依存性もない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明の第 2 の手段による光発生装置 800 の波長変換素子 802 は、円柱状強誘電体単結晶を組み合わせて形成されるため、製造時に破損した円柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した円柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による光発生装置 800 の波長変換素子 802 は、円柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

（本発明の第 2 の手段による発明の実施の形態 4）

本発明の第 2 の手段による発明は、さらに第二高調波発生を利用した光発生装置に係る発明を実施の形態として含むものである。その構成は、図 9 に示す光発生装置と基本的に同様であり、以下、本光発生装置は、図 9 に基づいて説明する。

光発生装置 900 は、光源 901 と、波長変換素子 902 と、制御部 903 とを含む。

光源 901 は、第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光（基本波）を発する。本発明によれば、第 1 の光の偏光は、TM モードであってもよいし、TE モードであっ

てもよい。光源 901 は、コヒーレントな第 1 の光を発するチューナブル半導体レーザ（波長可変レーザ）であり得る。

波長変換素子 902 は、実施の形態 2 で説明した波長変換素子 500、1400、1410、1500 のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子 902 は、光源 901 から受け取った第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光（第二高調波）に波長変換する。この際、波長変換素子 902 内の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。円柱状強誘電体単結晶に MgSLT を用いた場合、円柱状強誘電体単結晶の分極反転周期は、 $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲から選択される。円柱状強誘電体単結晶は、MgSLT に限定されない。

制御部 903 は、波長変換素子 902 の位置を制御する。詳細には、制御部 903 は、光源 901 から第 1 の光の有する情報（例えば、波長、偏光）に入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子 902 の位置を制御する。本明細書において、波長変換素子 902 の位置を制御するとは、制御部 903 が、光源 901 からの第 1 の光の有する情報のうち偏光モードに基づいて、波長変換素子 902 の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの配置角度を第 1 の光の偏光モードに対応するように制御すること、および／または、制御部 903 が、光源 901 からの第 1 の光の有する情報のうち波長に基づいて、波長変換素子 902 のうち所定の円柱状強誘電体単結晶に光源 901 が発する第 1 の光が照射するように、波長変換素子 902 の位置を制御することを意味する。制御部 903 は、例えば、円柱状強誘電体単結晶の第二高調波の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子 902 の位置を制御してもよい。制御部 903 は、ユーザが所望する波長の光が得られるように、光源 901 が発する第 1 の波長 λ_1 を設定するように光源 901 を制御してもよい。

光発生装置 900 は、光源 901 と波長変換素子 902 との間、および、波長変換素子 902 の出射側にそれぞれ反射ミラー（図示せず）を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置 900 の動作を説明する。

例えば、ユーザが、第 2 の波長 $\lambda_2 = 0.39 \mu\text{m}$ を有する第 2 の光を所望する場合、制御部 903 は、光源 901 が第 1 の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ を有する第 1 の波長を発するように、光源 901 を制御する。次いで、制御部 903 は、第 1 の光の有する情報（波長および偏光）等に基づいて、波長変換素子 902 の位置を制御する。この場合、制御部 903 は、第 1 の光が $3 \mu\text{m}$ の分極反転周期を有する円柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子 902 の位置を制御

する。波長変換素子 902 の所定の円柱状強誘電体単結晶に入射した第 1 の光は、上記の関係式を満たして、第 2 の波長 $\lambda_2 = 0.39 \mu\text{m}$ を有する第 2 の光（第二高調波）に波長変換される。

実施の形態 4 による光発生装置 900 は、それぞれが所定の周期を有する分極反転構造を有する円柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子 902 を含む。これにより、特に、基本波を発するチューナブルな光源 901 に対して常に位相整合した第二高調波を発生することができる（すなわち、光源 901 のチューナビリティを容易に達成する）。

実施の形態 1 で説明したように、円柱状強誘電体単結晶は、分極方向と同じ方向の断面が実質的に真円であるため、波長変換素子 902 に照射された光によって円柱状強誘電体単結晶に熱分布が生じる場合であっても、熱分布は必ず中心対称となる。その結果、光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子 902 が出射する光（第 2 の光）の形状は、円形に維持される。さらに、入射光の偏光方位に対する依存性もない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明による光発生装置 900 の波長変換素子 902 は、円柱状強誘電体単結晶を組み合わせて形成されるため、製造時に破損した円柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した円柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による光発生装置 900 の波長変換素子 902 は、円柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

（本発明の第 2 の手段による発明の実施の形態 5）

本発明の第 2 の手段による発明は、さらの差周波発生を利用した光発生装置に係る発明を実施の形態として含むものである。その構成は、図 10 に示す光発生装置と基本的に同様であり、以下、本光発生装置は、図 10 に基づいて説明する。

光発生装置 1000 は、光源 1001 と、結合光学系 1002 と、波長変換素子 1003 と、制御部 1004 とを含む。

光源 1001 は、第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光（ポンプ光）を発する。本発明によれば、第 1 の光の偏光は、TM モードであってもよいし、TE モードであってもよい。光源 1001 は、例えば、第 1 の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ の半導体レーザーであり得る。光源 1001 にチューナブル光源を用いてもよい。

結合光学系 1002 は、光源 1001 からの第 1 の光と、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光（シグナル光）とを結合する任意の光学系である。第 2 の光は、例えば、波長領域多重（WDM）において代表的な通信帯である C バンド帯（1.53 μm ~ 1.57 μm ）の光である。第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 は、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ を満たす。

波長変換素子 1003 は、実施の形態 2 で説明した波長変換素子 500、1400、1410、1500 のいずれか、または、その変形例である。波長変換素子 1003 は、結合光学系 1002 で結合された第 1 の光と第 2 の光とを、第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光（出力光）に波長変換する。この際、波長変換素子 1003 内の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と、第 2 の波長 λ_2 と、第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有する。円柱状強誘電体単結晶は、MgSLT に限定されない。

制御部 1004 は、波長変換素子 1003 の位置を制御する。詳細には、制御部 1004 は、光源 1001 から第 1 の光の有する情報（例えば、波長、偏光）および第 2 の光の有する情報（例えば、波長、偏光）を入手し、入手した情報に基づいて波長変換素子 1003 の位置を制御する。本明細書において、波長変換素子 1003 の位置を制御するとは、制御部 1004 が、光源 1001 からの第 1 の光の有する情報のうち偏光、および、第 2 の光の有する情報のうち偏光に基づいて、波長変換素子 1003 の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの配置角度を第 1 の光の偏光モードおよび第 2 の光の偏光に対応するように制御すること、および／または、制御部 1004 が、光源 1001 からの第 1 の光の有する情報のうち波長、および、第 2 の光の有する情報のうち波長に基づいて、波長変換素子 1003 内の所定の円柱状強誘電体単結晶に結合光学系 1002 で結合された第 1 の光および第 2 の光が照射するように、波長変換素子 1003 の位置を制御することを意味する。制御部 1004 は、例えば、円柱状強誘電体単結晶のシグナル光および出射光の周期依存性のデータ、および、温度依存性のデータを格納し、これらデータに基づいて波長変換素子 1003 の位置を制御してもよい。

光発生装置 1000 は、結合光学系 1002 と波長変換素子 1003 との間、および、波長変換素子 1003 の出射側にそれぞれ反射ミラー（図示せず）を設けて、共振器として機能させてもよい。

次に、光発生装置 1000 の動作を説明する。

例えば、ユーザが、第 1 の波長 $\lambda_1 = 0.78 \mu\text{m}$ を用いて、第 2 の波長 $\lambda_2 = 1.55 \mu\text{m}$ を有する第 2 の光（C バンド帯）を L バンド帯の波長を有する第 3

の光に変換することを所望する場合、制御部 1004 は、第 1 の光の有する情報（波長および偏光）および第 2 の光の有する情報（波長および偏光）等に基づいて、波長変換素子 1003 の位置を制御する。この場合、制御部 1004 は、結合光学系 1002 で結合された第 1 の光および第 2 の光が、例えば、 $17\mu\text{m}$ の分極反転周期を有する柱状強誘電体単結晶に入射するように、波長変換素子 1003 の位置を制御する。波長変換素子 1003 の所定の柱状強誘電体単結晶に入射した第 1 の光および第 2 の光は、上記の関係式を満たして、第 3 の波長 $\lambda_3 = 1.57\mu\text{m}$ を有する第 3 の光に波長変換される。このようにして変換された第 3 の波長 λ_3 は、波長領域多重（WDM）において代表的な通信帯である L バンド帯（ $1.57\mu\text{m} \sim 1.62\mu\text{m}$ ）である。

実施の形態 5 による光発生装置 1000 は、所定の周期を有する円柱状強誘電体単結晶を組み合わせたマルチグレーティングを有する波長変換素子 905 を含む。これにより、光源 1001 がチューナブル光源であれば、固定の C バンド帯の波長（第 2 の光の第 2 の波長 λ_2 ）を、L バンド帯の波長（第 3 の波長 λ_3 ）へとチューナブルに調整することができる。また、光源 1001 が単一波長を発する光源である場合、C バンド帯の波長（第 2 の光の第 2 の波長 λ_2 ）を可変にすれば、L バンド帯の波長（第 3 の波長 λ_3 ）をチューナブルに調整することができる。このように、C-L バンド変換をチューナブルに行うことができる。実施の形態 1 で説明したように、円柱状強誘電体単結晶は、分極方向と同じ方向の断面が実質的に真円であるため、波長変換素子 902 に照射された光によって円柱状強誘電体単結晶に熱分布が生じる場合であっても、熱分布が必ず中心対称となるので、光の高い消光比（すなわち、高い直線偏光性）を保持することができるとともに、波長変換素子 1003 が出射する光（第 3 の光）の形状は、円形に維持される。さらに、入射光の偏光方位に対する依存性もない。したがって、入射光の光源の自由度が増すとともに、光学系全体を小型化できる。

本発明による光発生装置 1000 の波長変換素子 1003 は、円柱状強誘電体単結晶を組み合わせて形成されるため、製造時に破損した円柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよく、歩留まりを向上させる。さらに、使用時には、破損した円柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、ユーザ側のコストの削減になる。本発明による光発生装置 1000 の波長変換素子 1003 は、円柱状強誘電体単結晶を任意に組み合わせて形成されるので、ユーザのニーズに合わせた調整が可能である。

図 10 に示される光発生装置 1000 を用いて、差周波発生させる場合を説明したが、光発生装置 1000 を用いて和周波発生させることもできることに留意

されたい。この場合、波長変換素子 1003 内の複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と、第 2 の波長 λ_2 と、第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有していればよい。

産業上の利用可能性

本発明の波長変換素子は、ホルダーと、ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含む。複数の角柱状強誘電体単結晶は、少なくとも 5 つの面を有しており、それぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は、実質的に 1 である。これにより、角柱状強誘電体単結晶の配置を変更するだけで、入射光の偏光に対応させることができる。したがって、偏光子等の光学系が不要であるため、系全体を小型化することができる。

複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、分極方向に対して垂直な方向に、所定の周期を有する分極反転構造を有しており、分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている。これにより、分極反転構造の作製に失敗した角柱状強誘電体単結晶のみを破棄すればよいので、波長変換素子作製時における歩留まりを向上させることができる。波長変換素子のうち 1 つの角柱状強誘電体単結晶にクラックが生じたとしても、隣接する角柱状強誘電体単結晶にはクラックが伝播することはない。また、損傷した角柱状強誘電体単結晶のみを交換すればよく、コストを削減することができる。また、ユーザのニーズに応じて、所望の組み合わせを達成することができる。

本発明による波長変換素子は、それぞれが所定の周期を有する分極反転構造を有する円柱状強誘電体単結晶を組み合わせ、マルチグレーティングを有する波長変換素子を形成することによって、変換波長のチューナビリティを容易に達成する。このような波長変換素子を化学分析、通信等に利用することができる。

請 求 の 範 囲

1. ホルダーと、

前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶と

を含む波長変換素子であって、

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、少なくとも5つの面を有しており、

前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は、実質的に1であり、

前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に、所定の周期を有する分極反転構造を有しており、

前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、波長変換素子。

2. 前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項1に記載の波長変換素子。

3. 前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項1に記載の波長変換素子。

4. 前記所定の周期は、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項1に記載の波長変換素子。

5. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは6つの面を有する、請求項1に記載の波長変換素子。

6. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーブした実質

的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択される、請求項 1 に記載の波長変換素子。

7. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 1 に記載の波長変換素子。

8. 前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項 1 に記載の波長変換素子。

9. 前記温度制御素子を制御する制御部をさらに含む、請求項 8 に記載の波長変換素子。

10. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項 1 に記載の波長変換素子。

11. 第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を発する光源と、
前記第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光と第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光とに変換する波長変換素子と、

前記波長変換素子の位置を制御する制御部と

を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも 5 つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に 1 であり、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 と第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。

12. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは 6 つの面を有する、請求項 11 に記載の光発生装置。

13. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比

組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択される、請求項 1 1 に記載の光発生装置。

1 4. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 1 1 に記載の光発生装置。

1 5. 前記波長変換素子は、
前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項 1 1 に記載の光発生装置。

1 6. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項 1 5 に記載の光発生装置。

1 7. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項 1 1 に記載の光発生装置。

1 8. 第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を発する光源と、
前記第 1 の光を第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光に変換する波長変換素子と、
前記波長変換素子の位置を制御する制御部と
を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも 5 つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に 1 であり、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 とが関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。

1 9. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは 6 つの面を有する、請求項 1 8 に記載の光発生装置。

2 0. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム

、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーブした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーブした実質的に定比組成のタンタ

ル酸リチウムからなる群から選択される、請求項 18 に記載の光発生装置。

21. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 18 に記載の光発生装置。

22. 前記波長変換素子は、

前記ホルダーに設置された温度制御素子と、

前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームとをさらに含む、請求項 18 に記載の光発生装置。

23. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項 22 に記載の光発生装置。

24. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項 18 に記載の光発生装置。

25. 第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を発する第 1 の光源と、

前記第 1 の光と、外部から入射した第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光とを結合させる光学系と、

前記第 1 の光と第 2 の光とを、第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光に変換する波長変換素子と、

前記波長変換素子の位置を制御する制御部と

を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の角柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は少なくとも 5 つの面を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれの長手方向に対して垂直な面の縦横比は実質的に 1 であり、前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 と第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、前記複数の角柱状強誘電体単結晶それぞれの分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の角柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。

26. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは 6 つの面を有する、請求項 25 に記載の光発生装置。

27. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーブした実

質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択される、請求項 25 に記載の光発生装置。

28. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 25 に記載の光発生装置。

29. 前記波長変換素子は、
前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項 25 に記載の光発生装置。

30. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項 29 に記載の光発生装置。

31. 前記複数の角柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項 25 に記載の光発生装置。

32. 断面が実質的に真円である円柱状強誘電体単結晶からなり、前記円柱状強誘電体単結晶が、前記分極方向に垂直な方向に所定の周期を有する分極反転構造を有する波長変換素子。

33. 前記円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群から選択される、請求項 32 に記載の波長変換素子。

34. 前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光と第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光とに変換する場合、前記第 1 の波長 λ_1 と前記第 2 の波長 λ_2 と前記第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項 32 に記載の波長変換素子。

35. 前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光に変換する場合、前記第 1 の波長 λ_1 と前記第 2 の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項 32 に記載の波長変換素子。

36. 前記所定の周期は、前記円柱状強誘電体単結晶が、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項32に記載の波長変換素子。

37. ホルダーと、

前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶と
を含む波長変換素子であって、

前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、前記分極方向に垂直な方向に所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、波長変換素子。

38. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択される、請求項37に記載の波長変換素子。

39. 前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を、第2の波長 λ_2 を有する第2の光と第3の波長 λ_3 を有する第3の光とに変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 と前記第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項37に記載の波長変換素子。

40. 前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2 とが、関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項37に記載の波長変換素子。

41. 前記所定の周期は、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれが、第1の波長 λ_1 を有する第1の光と第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する場合、前記第1の波長 λ_1 と前記第2の波長 λ_2

と前記第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、擬似位相整合する周期である、請求項 37 に記載の波長変換素子。

42. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 37 に記載の波長変換素子。

43. 前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項 37 に記載の波長変換素子。

44. 前記温度制御素子を制御する制御部をさらに含む、請求項 43 に記載の波長変換素子。

45. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項 37 に記載の波長変換素子。

46. 第 1 の波長 λ_1 を有する第 1 の光を発する光源と、
前記第 1 の光を、第 2 の波長 λ_2 を有する第 2 の光と第 3 の波長 λ_3 を有する第 3 の光とに変換する波長変換素子と、

前記波長変換素子の位置を制御する制御部と
を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの第 1 の波長 λ_1 と第 2 の波長 λ_2 と第 3 の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 = 1/\lambda_2 + 1/\lambda_3$ 、関係 $\lambda_1 < \lambda_2$ および $\lambda_1 < \lambda_3$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。

47. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択される、請求項 46 に記載の光発生装置。

48. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項 46 に記載の光発生装置。

49. 前記波長変換素子は、
前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項46に記載の光発生装置。
50. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項49に記載の光発生装置。
51. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項46に記載の光発生装置。
52. 第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する光源と、
前記第1の光を第2の波長 λ_2 を有する第2の光に変換する波長変換素子と、
前記波長変換素子の位置を制御する制御部と
を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれは、第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 とが関係 $\lambda_1 = 2 \times \lambda_2$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。
53. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択される、請求項52に記載の光発生装置。
54. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項52に記載の光発生装置。
55. 前記波長変換素子は、
前記ホルダーに設置された温度制御素子と、
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと
をさらに含む、請求項52に記載の光発生装置。

56. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項55に記載の光発生装置。

57. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項52に記載の光発生装置。

58. 第1の波長 λ_1 を有する第1の光を発する第1の光源と、

前記第1の光と、外部から入射した第2の波長 λ_2 を有する第2の光とを結合させる光学系と、

前記第1の光と第2の光とを、第3の波長 λ_3 を有する第3の光に変換する波長変換素子と、

前記波長変換素子の位置を制御する制御部と

を含む光発生装置であって、前記波長変換素子は、ホルダーと、前記ホルダーに配置された複数の円柱状強誘電体単結晶とを含み、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの断面は実質的に真円であり、前記複数の円柱状強誘電体単結晶のそれぞれの第1の波長 λ_1 と第2の波長 λ_2 と第3の波長 λ_3 とが、関係 $1/\lambda_1 \pm 1/\lambda_2 = 1/\lambda_3$ を満たすように、前記分極方向に対して垂直な方向に擬似位相整合する所定の周期を有する分極反転構造を有しており、前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、前記分極方向に対して垂直な方向が同一となるように配置されている、光発生装置。

59. 前記複数の円柱状強誘電体単結晶は、実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、実質的に定比組成のタンタル酸リチウム、不純物をドーピングした実質的に定比組成のニオブ酸リチウム、および、不純物をドーピングした実質的に定比組成のタンタル酸リチウムからなる群からそれぞれ選択される、請求項58に記載の光発生装置。

60. 前記ホルダーは熱伝導性材料から形成される、請求項58に記載の光発生装置。

61. 前記波長変換素子は、

前記ホルダーに設置された温度制御素子と、

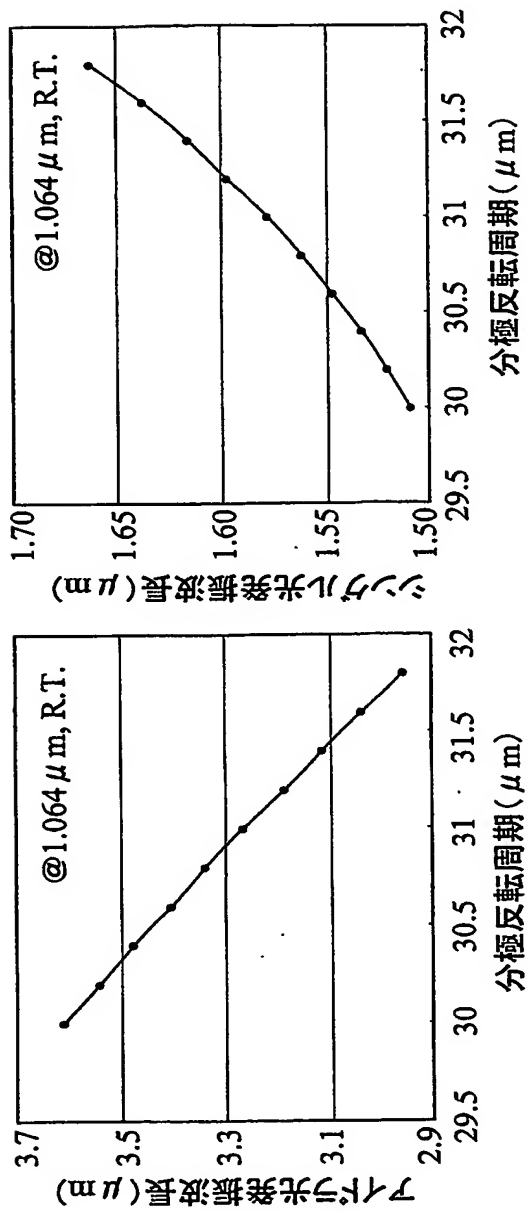
前記ホルダーと前記温度制御素子とを包囲する断熱性フレームと

をさらに含む、請求項58に記載の光発生装置。

62. 前記制御部は、さらに、前記温度制御素子の温度を制御する、請求項61に記載の光発生装置。

63. 前記複数の柱状強誘電体単結晶は所定の間隔で配置されており、前記所定の間隔に熱伝導性材料が充填されている、請求項58に記載の光発生装置。

Fig. 1



BEST AVAILABLE COPY

Fig. 2

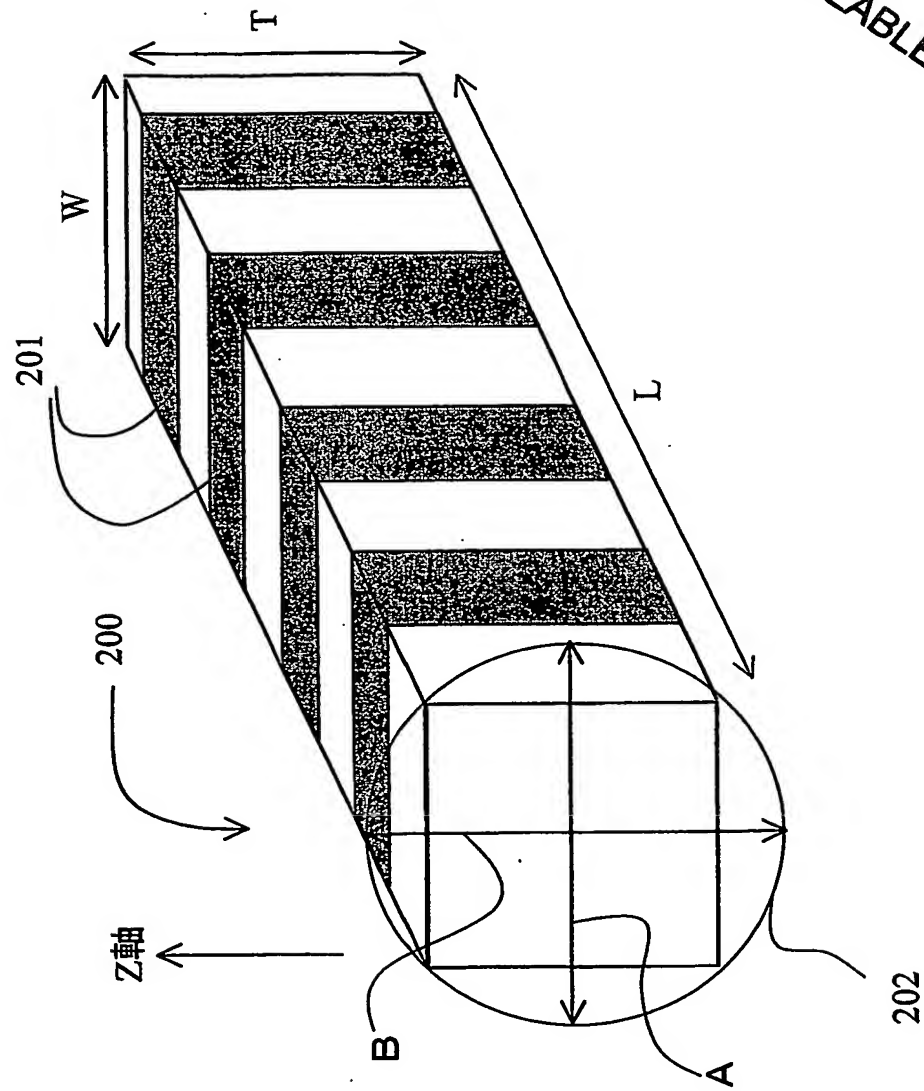


Fig. 3

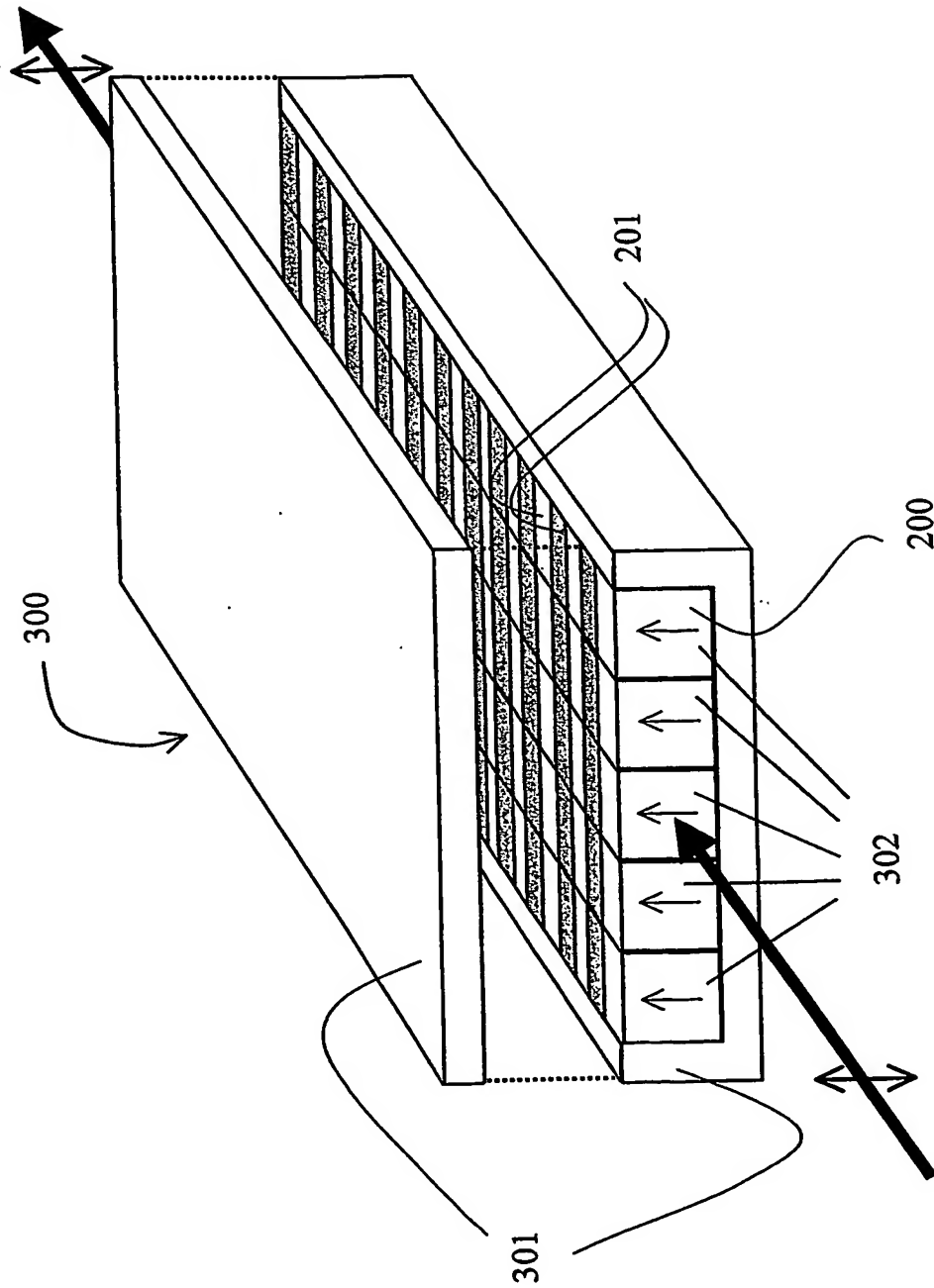


Fig. 4

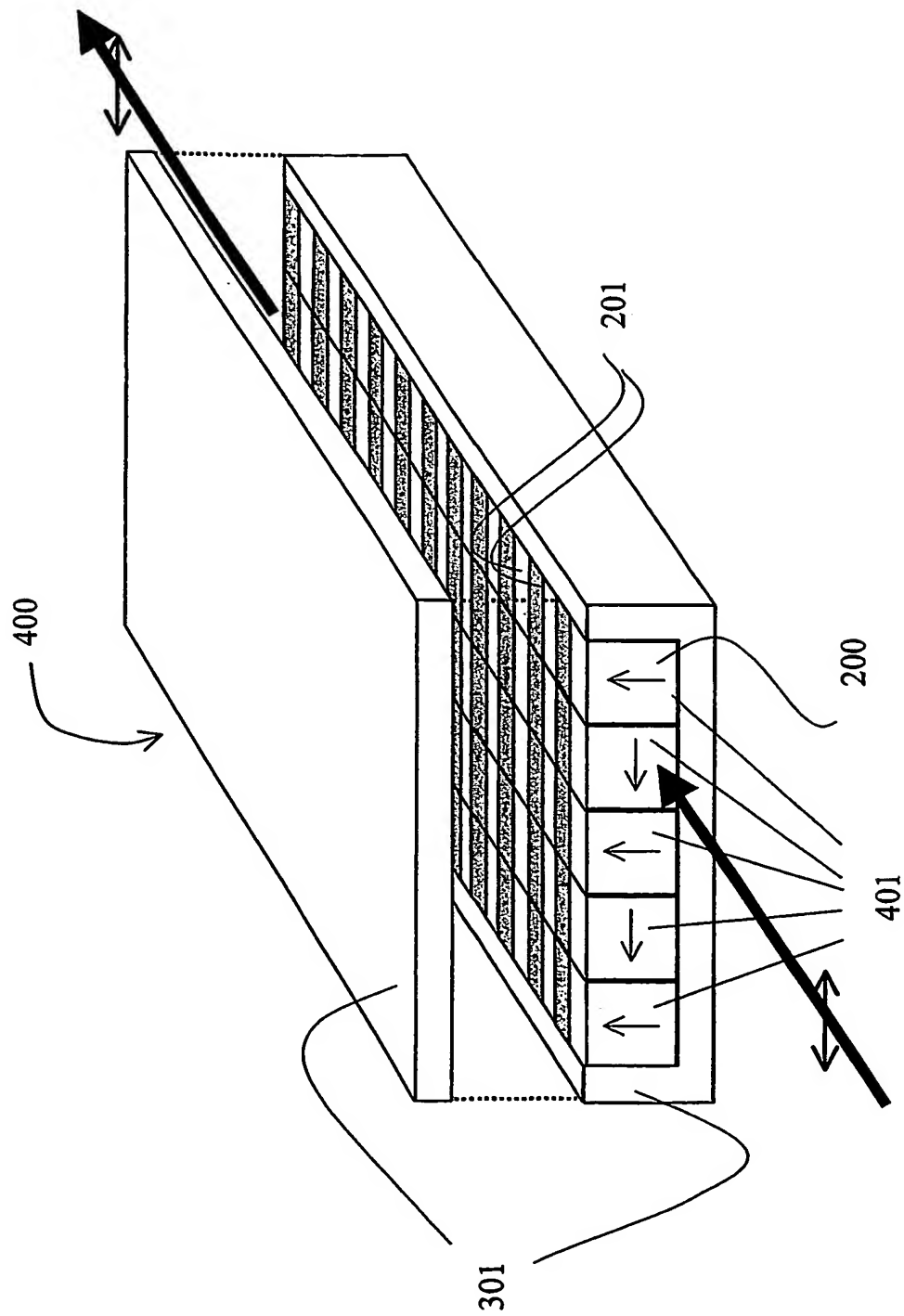


Fig. 5

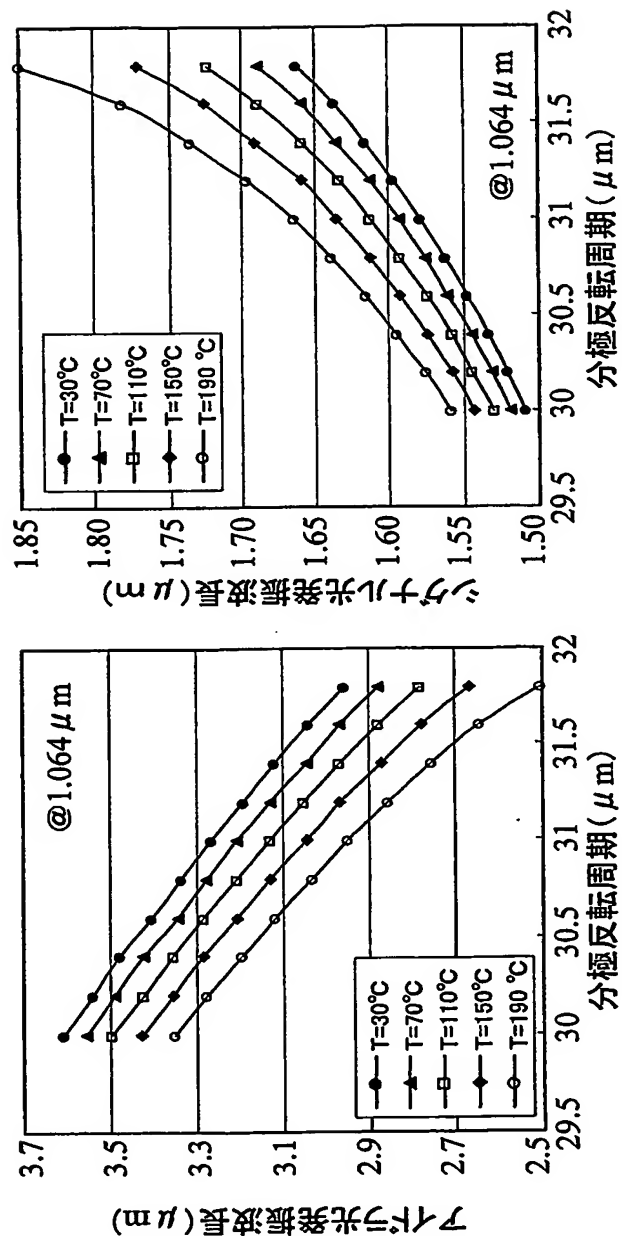


Fig. 6

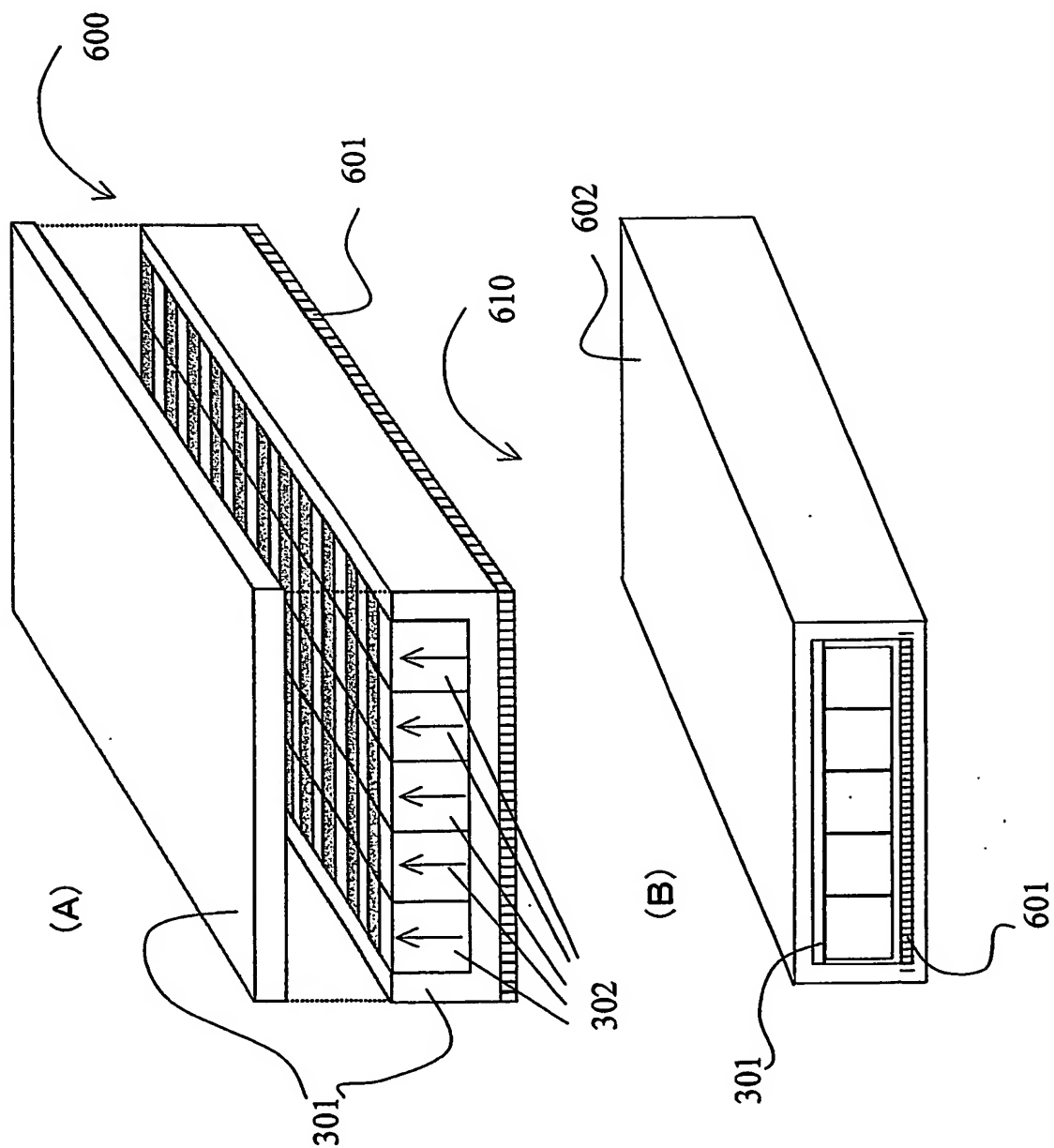
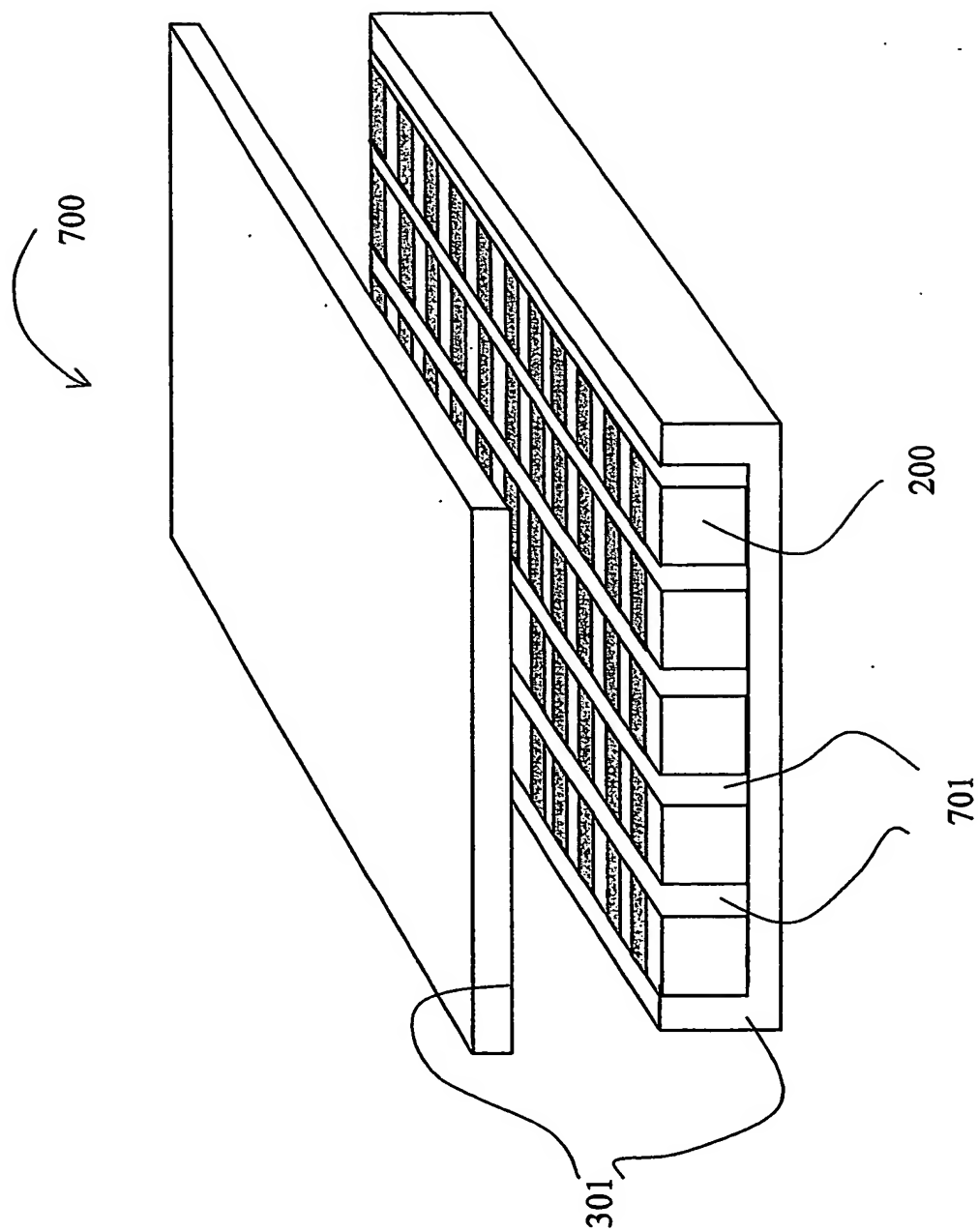


Fig. 7



F i g . 8

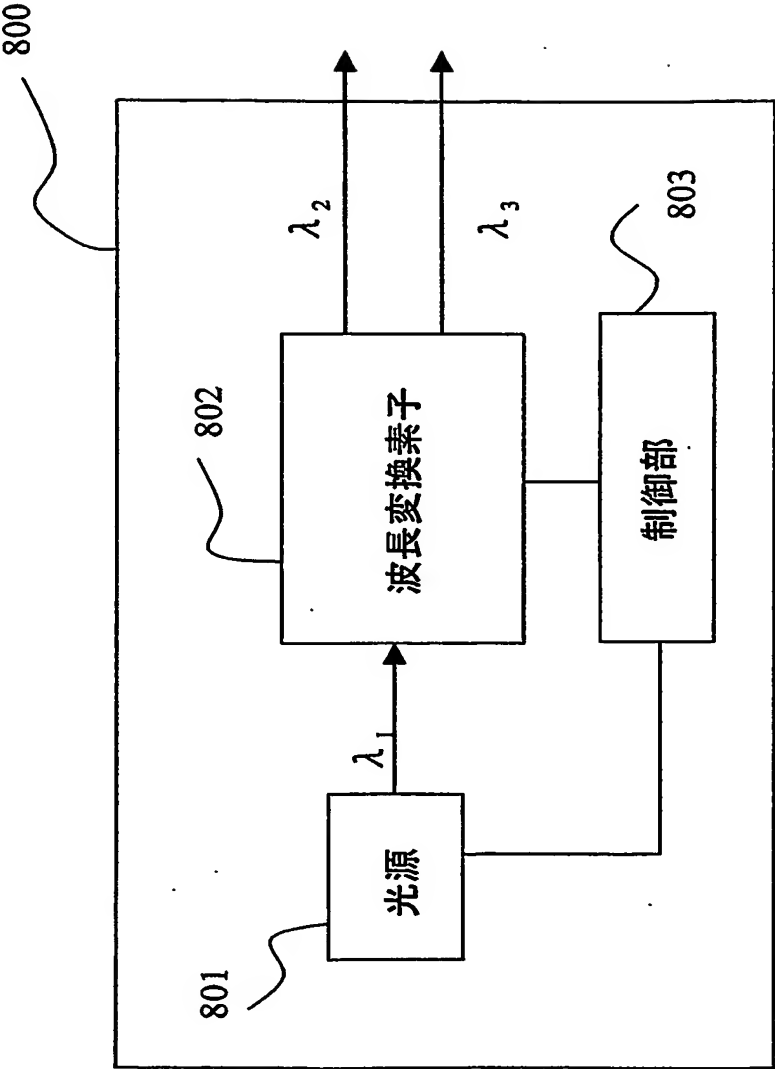


Fig. 9

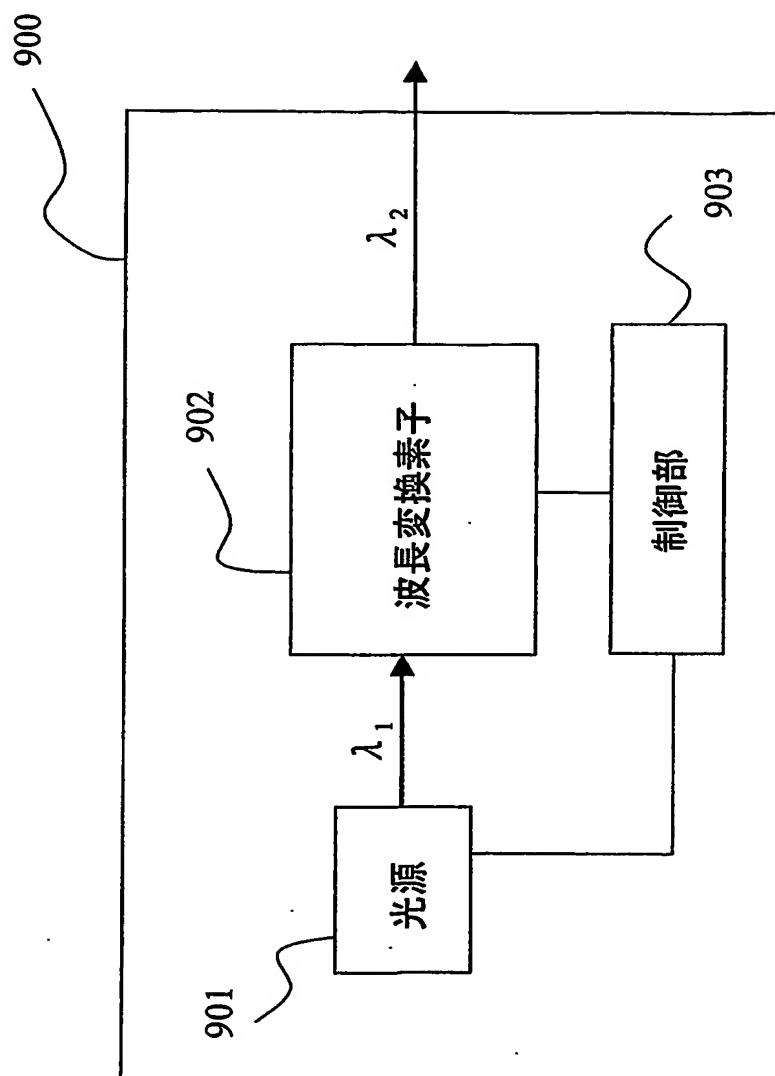


Fig. 10

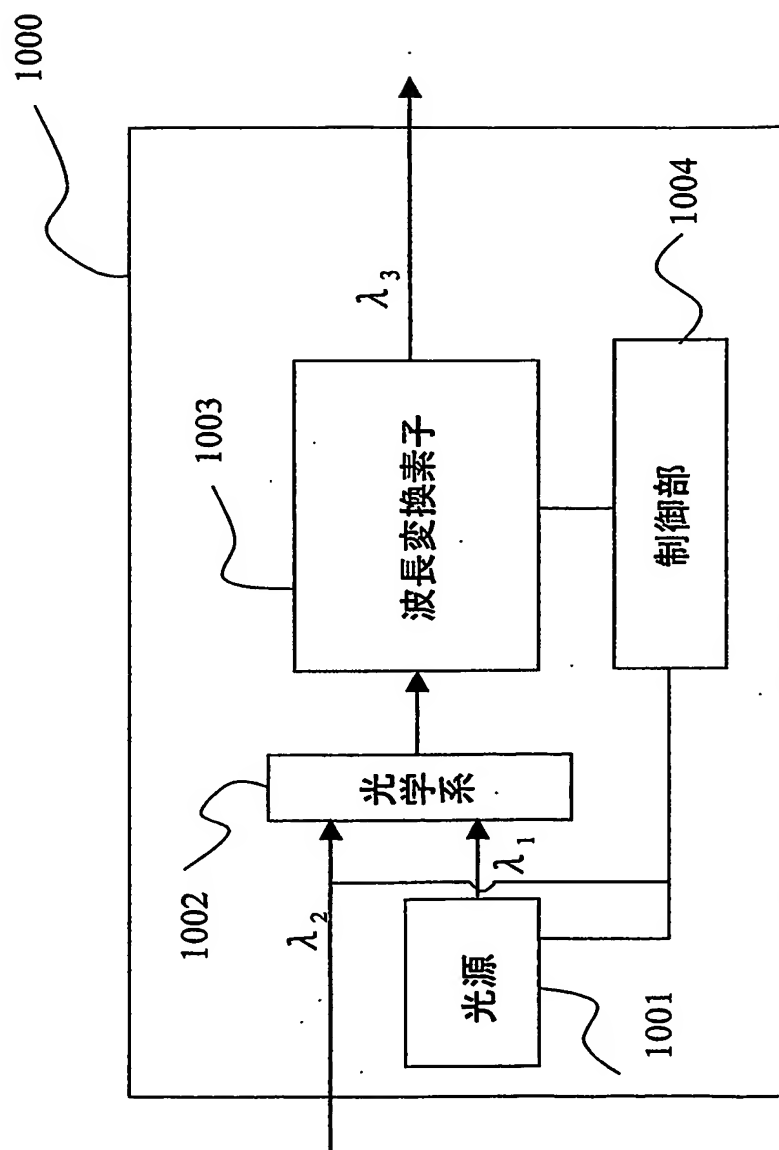


Fig. 11

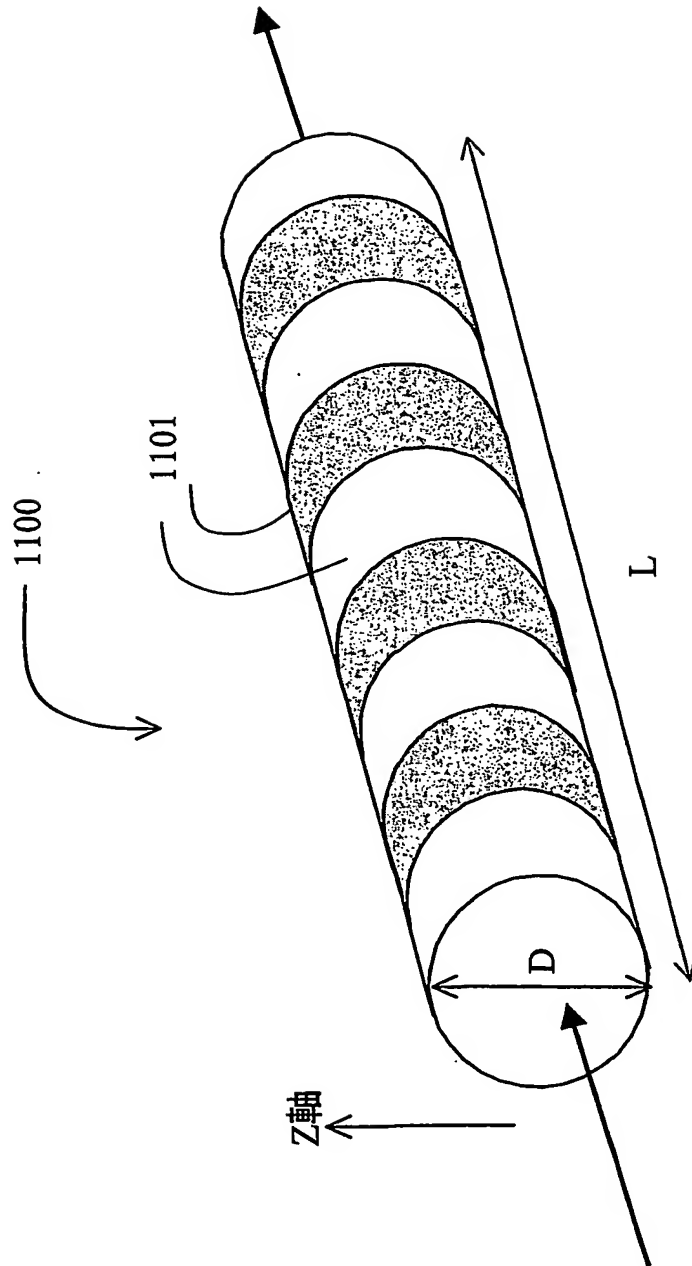


Fig. 12

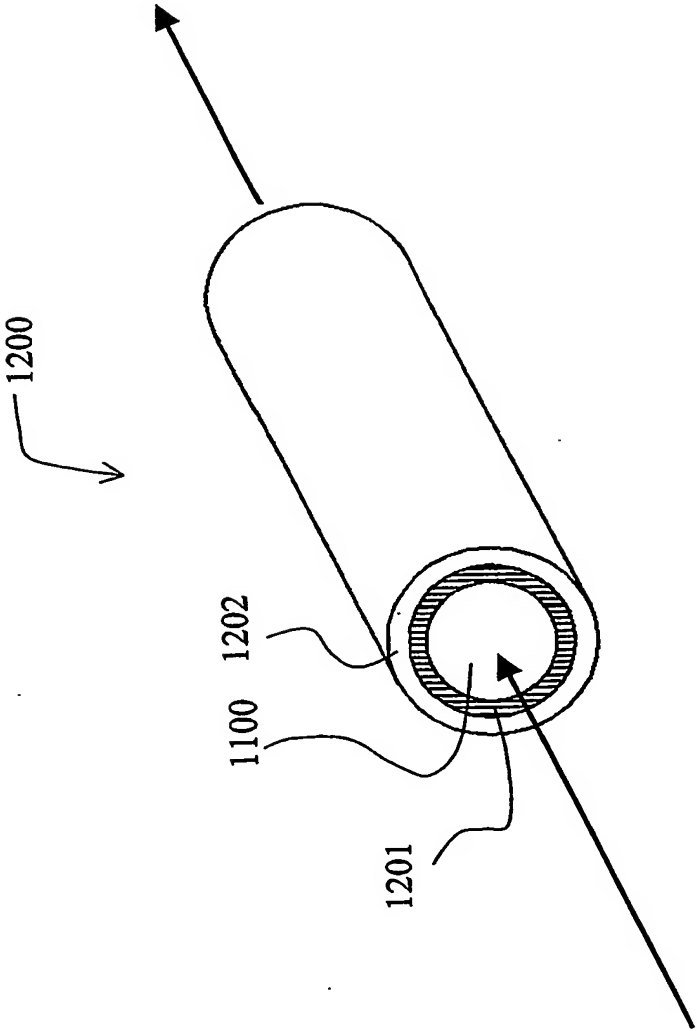


Fig. 13

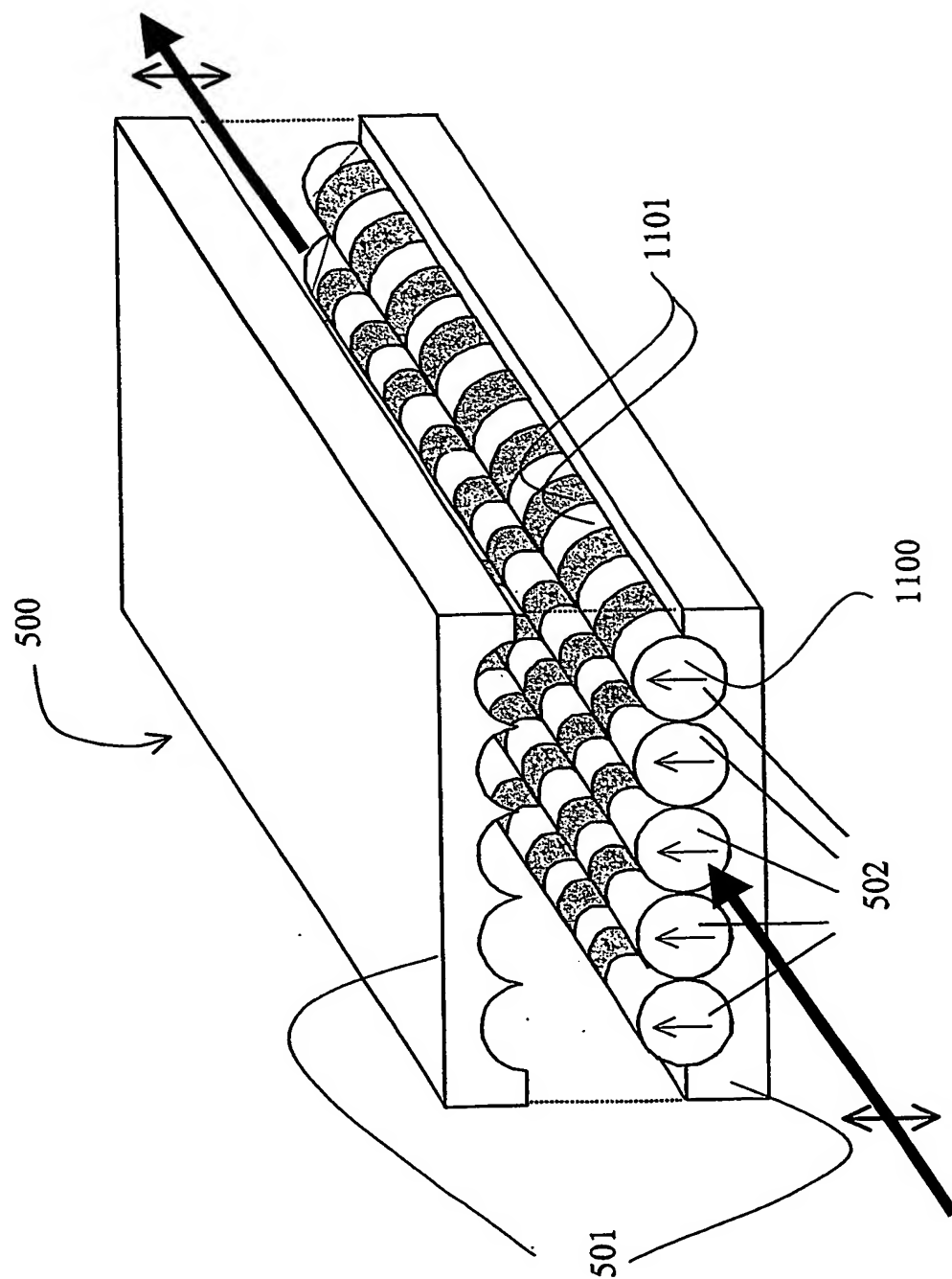


Fig. 14

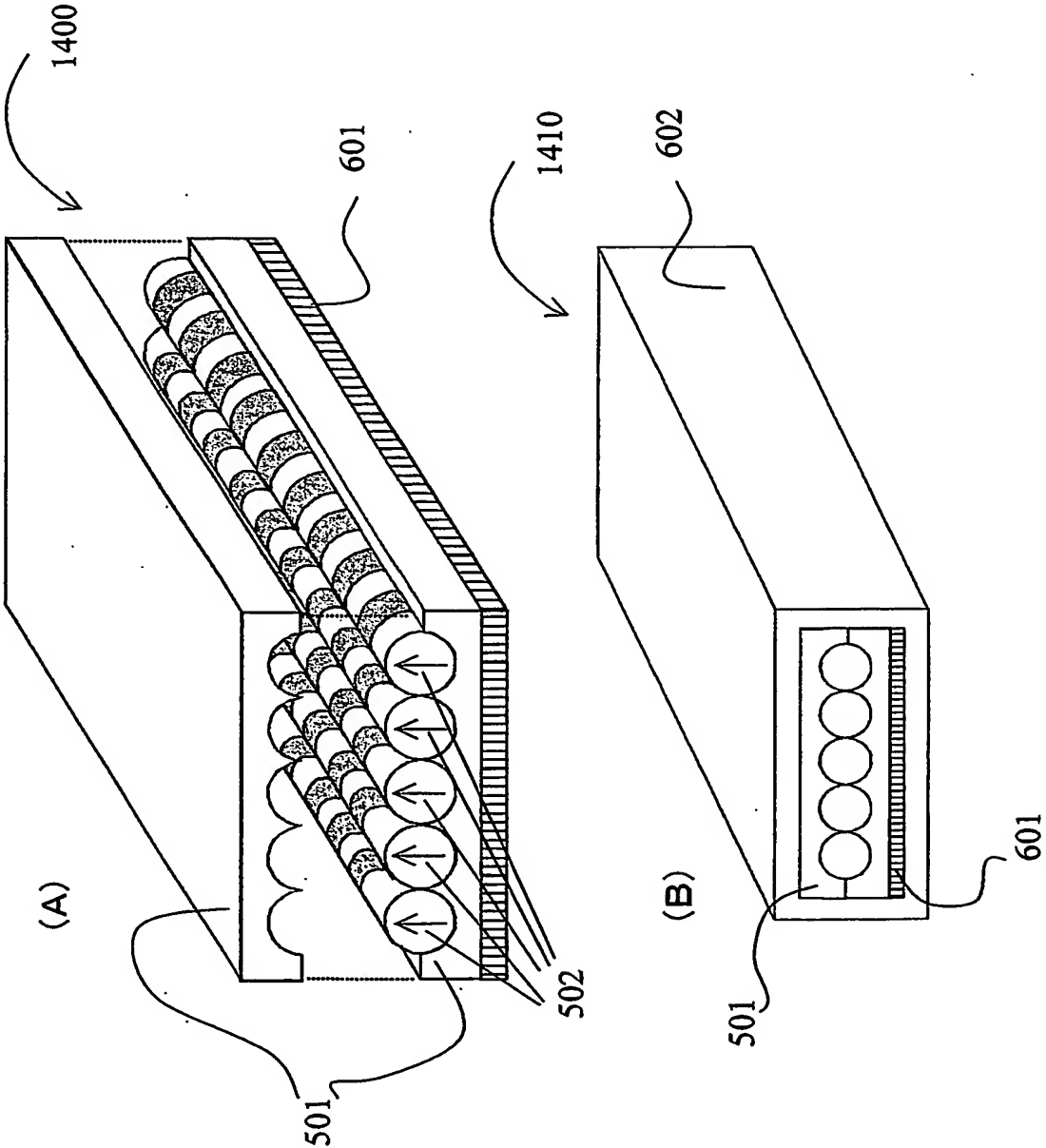


Fig. 15

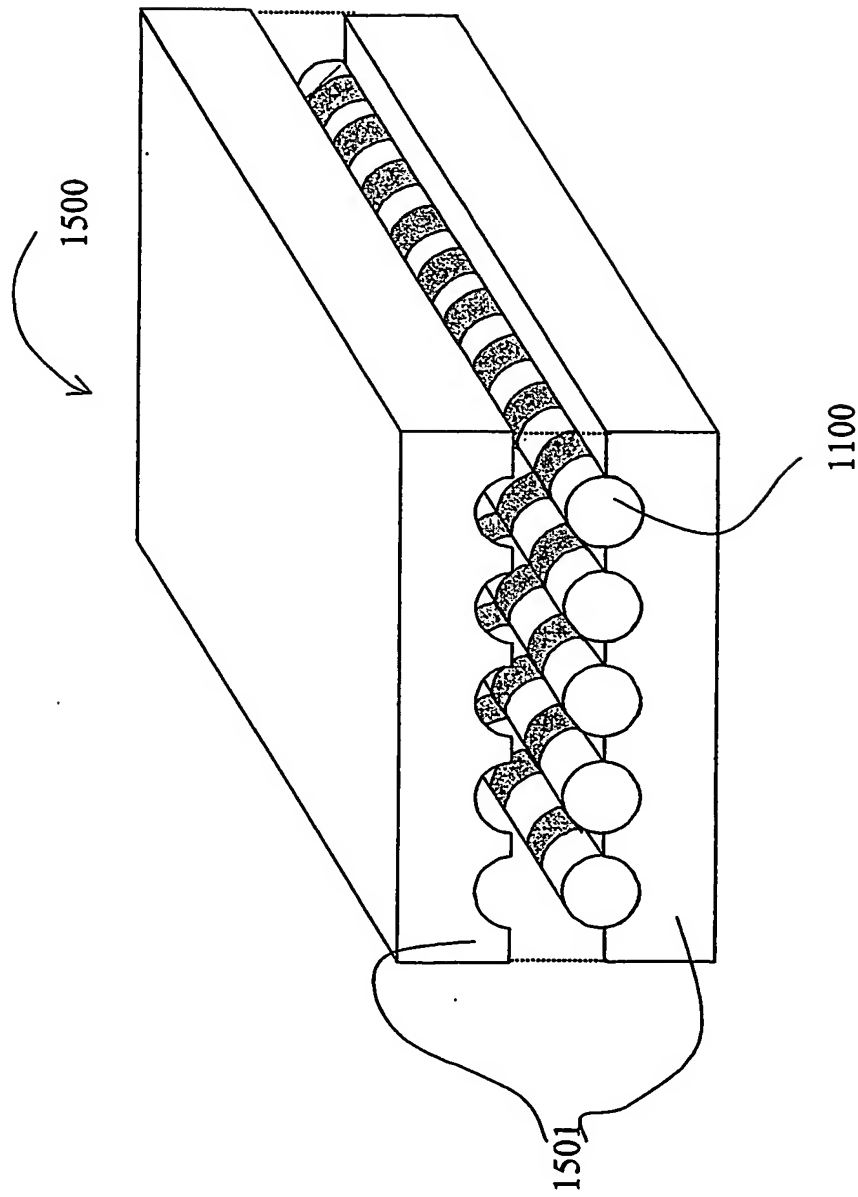
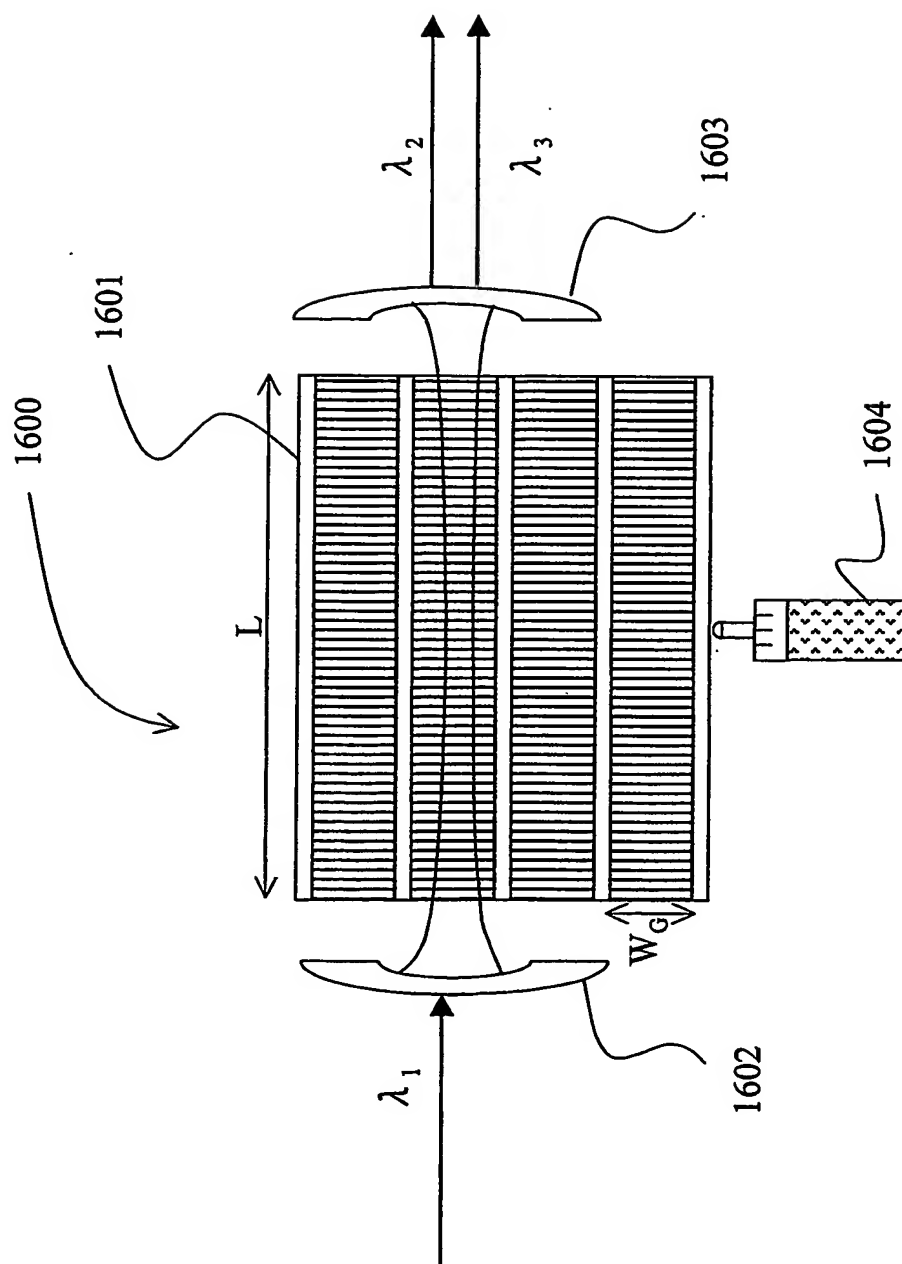
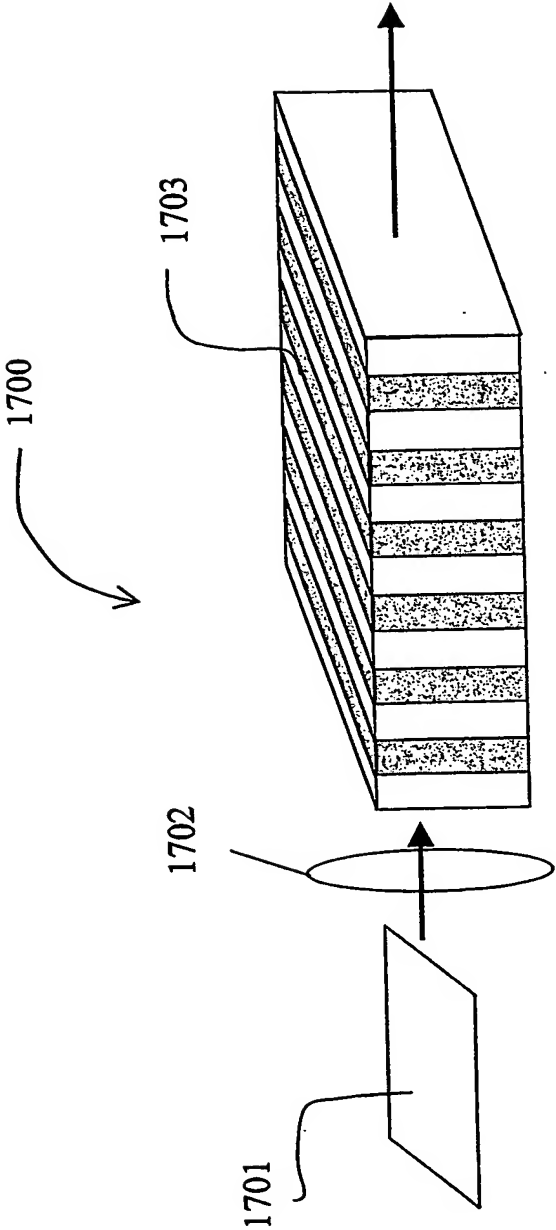


Fig. 16



従来技術

Fig. 17



従来技術

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/017653

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G02F1/37

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G02F1/37

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1922-1996 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2004 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2004 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2004 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------------|
| X Y | JP 2002-156669 A (Mitsui Chemicals, Inc.), 31 May, 2002 (31.05.02), Figs. 4, 6, 9 & EP 1186942 A2 & US 2002/63945 A1 & CN 1343906 A | 1, 5 2-4, 6-31, 37-63 |
| Y | JP 2000-338531 A (Toshiba Corp.), 08 December, 2000 (08.12.00), Par. No. [0026] (Family: none) | 2, 11-17, 34, 39, 46-51 |
| Y | JP 2003-307759 A (Canon Inc.), 31 October, 2003 (31.10.03), Par. No. [0001] & US 2003/151797 A1 & EP 1336895 A2 | 4, 25-31, 36, 41, 58-63 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
16 December, 2004 (16.12.04)

Date of mailing of the international search report
11 January, 2005 (11.01.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/017653

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|-----------|---|--|
| Y | JP 2002-90785 A (Independent Administrative Institution National Institute for Materials Science), 27 March, 2002 (27.03.02), Full text & US 2002/33993 A1 | 3, 6, 13, 18-24, 27, 33, 35, 38, 40, 47, 52-57, 59 |
| Y | JP 9-304800 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 28 November, 1997 (28.11.97), Par. No. [0057] (Family: none) | 7, 10, 14, 17, 21, 24, 28, 31, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63 |
| Y | JP 7-234428 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 05 September, 1995 (05.09.95), Par. No. [0046]; Fig. 9 (Family: none) | 8, 9, 15, 16, 22, 23, 29, 30, 43, 44, 49, 50, 55, 56, 61, 62 |
| X Y | JP 8-76160 A (Oki Electric Industry Co., Ltd.), 22 March, 1996 (22.03.96), Par. No. [0043]; Fig. 4 (Family: none) | 32, 35 33, 34, 36-63 |

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/017653

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

"A special technical feature" in claims 1-31, 37-63 relate to "a plurality of wavelength conversion elements disposed in a holder", and "a special technical feature" in claims 32-36 relate to "a wavelength conversion element provided with a substantially circular section". These inventions are not considered to be so linked as to form a single general inventive concept, because there is no technical relationship among those inventions involving one or more of the same or corresponding technical features.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

| | | | |
|--|--|---|--|
| A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ G02F1/37 | | | |
| B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl ⁷ G02F1/37 | | | |
| 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2004年 日本国登録実用新案公報 1994-2004年 日本国実用新案登録公報 1996-2004年 | | | |
| 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) | | | |
| C. 関連すると認められる文献 | | | |
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 | |
| X Y | J P 2002-156669 A (三井化学株式会社) 200 2.05.31, 図4, 6, 9 & EP 1186942 A2 & US 2002/63945 A1 & CN 134390 6 A | 1, 5 2-4, 6- 31, 37- 63 | |
| Y | J P 2000-338531 A (株式会社東芝) 2000.1 2.08, 【0026】 (ファミリーなし) | 2, 11-1 7, 34, 3 9, 46-5 1 | |
| Y | J P 2003-307759 A (キャノン株式会社) 200 | 4, 25-3 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列举されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。 | | | |
| * 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献 | | | |
| 国際調査を完了した日 16.12.2004 | | 国際調査報告の発送日 11.1.2005 | |
| 国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号 | | 特許庁審査官 (権限のある職員) 佐藤 宙子 2X 3314 電話番号 03-3581-1101 内線 3293 | |

| C (続き): 関連すると認められる文献 | | |
|----------------------|---|---|
| 引用文献の カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する 請求の範囲の番号 |
| | 3. 10. 31, 【0001】 & US 2003/151797 A1 & EP 1336895 A2 | 1, 36, 4 1, 58-6 3 |
| Y | JP 2002-90785 A (独立行政法人物質・材料研究機構) 2002. 03. 27, 全文 & US 2002/33993 A1 | 3, 6, 1 3, 18-2 4, 27, 3 3, 35, 3 8, 40, 4 7, 52-5 7, 59 |
| Y | JP 9-304800 A (松下電器産業株式会社) 1997. 11. 28, 【0057】 (ファミリーなし) | 7, 10, 1 4, 17, 2 1, 24, 2 8, 31, 4 2, 45, 4 8, 51, 5 4, 57, 6 0, 63 |
| Y | JP 7-234428 A (松下電器産業株式会社) 1995. 09. 05, 【0046】、図9 (ファミリーなし) | 8, 9, 1 5, 16, 2 2, 23, 2 9, 30, 4 3, 44, 4 9, 50, 5 5, 56, 6 1, 62 |
| X Y | JP 8-76160 A (沖電気工業株式会社) 1996. 03. 22, 【0043】、図4 (ファミリーなし) | 32, 35 33, 34, 36-63 |

第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見 (第1ページの2の続き)

法第8条第3項 (PCT 17条(2)(a)) の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。
つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見 (第1ページの3の続き)

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるとこの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1-31, 37-63の「特別な技術的特徴」は「ホルダーに配置された複数の波長変換素子」に関し、請求の範囲32-36の「特別な技術的特徴」は「断面が実質的に真円である波長変換素子」に関するものである。これらの発明は、一又は二以上の同一又は対応する特別な技術的特徴を含む技術的な関係にないから、単一の一般的発明概念を形成するように連関しているものとは認められない。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☒ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。
☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。